



João Tiago de Jesus Martins Correia

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Avaliação da higroscopicidade de materiais correntes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Construção

Orientador: Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques

Júri:

Presidente:	Professora Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues
Arguente:	Professor Doutor Vasco Nunes da Ponte Moreira Rato
Vogal:	Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2013

O presente trabalho foi suportado por fundos COMPETE na sua componente FEDER e pelo orçamento da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, sob o projecto de investigação PTDC/ECM-COM/3080/2012.

“Copyright” João Tiago de Jesus Martins Correia, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Fernando Henriques, orientador científico do presente trabalho, pela total disponibilidade, por todo o conhecimento transmitido e pela simpatia demonstrada.

Ao Engenheiro Vítor Silva, gostaria de agradecer o apoio e ajuda incansável nas actividades laboratoriais e os ensinamentos transmitidos no decorrer dos ensaios experimentais.

Agradeço também ao Engenheiro Jorge Jorne e mais uma vez ao Professor Fernando Henriques, pelas discussões bastante estimulantes e pelo esclarecimento de algumas dúvidas que permitiram a realização e o desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial aos meus colegas e amigos, Célia Rodrigues, Gonçalo Telo e Frederico Abegão que me acompanharam e apoiaram desde o início.

Como o meu percurso académico não se resumiu apenas a estudo e trabalho, quero agradecer ainda a todos os meus amigos, dentro e fora da faculdade, com os quais partilhei bons momentos de lazer e espírito académico. A lista é extensa e difícil de enumerar sem esquecer alguém, mas sou consciente que os referentes sabem quem são.

À minha namorada, Ana Sofia Silva, por toda a estima, respeito, paciência, boa disposição e sensatez com que me aconselhou e conduziu para a meta final.

Por fim, e mais importante, aos meus pais, padrinhos e irmão por estarem sempre comigo durante todo o meu processo académico, facilitando-o e apoiando-o sem qualquer restrição, tal como sempre fizeram ao longo da minha vida.

Resumo

A variação da humidade relativa (HR) do ambiente reflecte-se nos materiais porosos através do aumento ou diminuição do seu teor de água decorrente das suas condições de adsorção e desadsorção, entendidas neste contexto como os mecanismos de adesão de moléculas de água à superfície dos poros (ou de libertação dessas moléculas no caso da desadsorção), conceito que não deve ser confundido com absorção que corresponde à migração de água líquida no interior dos poros. Como se verá nesta dissertação, essa variação de teor de água influencia directamente a condutibilidade térmica dos materiais, podendo originar fenómenos inesperados de condensações, superficiais ou internas, para além de poder influenciar as suas condições de degradação.

O estudo efectuado neste trabalho incide na análise de uma colecção de materiais comumente utilizados na construção, os quais foram sujeitos a ambientes artificiais no interior de uma câmara climática, com valores de HR a variar entre os 40 e os 95% em condições isotérmicas de 23 °C. Tal procedimento permite a construção de curvas de armazenamento de humidade, através das quais é possível analisar graficamente a evolução do teor de água com a variação da humidade relativa, bem como a presença do efeito histerético entre os fenómenos de adsorção e desadsorção, para cada um dos materiais analisados. Durante este processo analisa-se também a evolução da condutibilidade térmica com a variação do teor de água de cada material.

São ainda realizados ensaios de análise da estrutura porosa das amostras com recurso ao método de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), pelo qual é possível obter informações sobre a porometria e morfologia da estrutura porosa.

Palavras chave:

Higroscopicidade; curva de armazenamento de humidade; adsorção isotérmica; histerese; condutibilidade térmica; porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP).

Abstract

The variations of the relative humidity (RH) in the environment are reflected in porous materials by increasing or decreasing the water content resulting from adsorption and desorption. These phenomena are defined herein as the mechanisms of adhesion (or release in the case of desorption) of water molecules to pore surfaces, a concept that should not be confused with absorption which corresponds to liquid water migration. The variation of water content influences directly thermal conductivity, which may induce unexpected surface or internal condensations, enhancing degradation mechanisms.

The study undertaken in this dissertation focuses on the analysis of materials commonly used in construction, which were subjected to artificial environments inside a climatic chamber in isothermal conditions at 23 °C with RH varying between 40 and 95%. This procedure allows the definition of moisture storage curves, which allow graphic analysis of the evolution of water content with relative humidity variations, as well as the presence of the hysteretic effect between adsorption and desorption for each material. During this process the evolution of the thermal conductivity with the variations of water contents of each material was also analyzed.

Further analysis of porous structure of some materials using the method of mercury intrusion porosimetry (MIP) was conducted, through which it becomes possible to obtain information about the porometry and morphology of the porous structure and to correlate this information with the adsorption behaviour of the materials.

Keywords:

Hygroscopicity; moisture storage curves; adsorption isotherm; hysteresis; thermal conductivity; mercury intrusion porosimetry (MIP).

Índice de Matérias

1	Introdução	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objectivo e metodologia	1
1.3	Estrutura da dissertação	2
2	Humidade em materiais porosos	3
2.1	Ar húmido	3
2.1.1	Humidade Relativa	4
2.1.2	Diagrama de Glaser	5
2.1.3	Teor de água	5
2.1.4	Curva de armazenamento de humidade	7
2.1.5	Região higroscópica	8
2.1.6	Região capilar	10
2.1.7	Adsorção e absorção	11
2.1.8	Fenómeno de histerese entre os processos de adsorção e desadsorção	12
2.2	Influência do teor de humidade no conforto dos edifícios	16
2.2.1	Salubridade	16
2.3	Condutibilidade térmica	17
2.4	Porometria	18
2.4.1	Porosimetria por intrusão de mercúrio	18
3	Análise experimental	23
3.1	Materiais ensaiados	23
3.2	Caracterização dos materiais analisados	25
3.2.1	Massa volúmica e porosidade aberta	25
3.2.2	Adsorção isotérmica	27
3.2.3	Condutibilidade térmica	30
3.2.4	Porosimetria por intrusão de mercúrio	34
4	Análise de resultados	43
4.1	Massa volúmica, massa específica e porosidade aberta	44
4.2	Adsorção/desadsorção e λ	46
4.2.1	XPS e EPS	46
4.2.2	Aglomerado de cortiça e lã-mineral	47
4.2.3	Pedra natural	49
4.2.4	Material cerâmico	50
4.2.5	Estuque	54

4.2.6	Betão celular autoclavado	57
4.3	Influência da dosagem de cimento	60
4.3.1	Argamassas de cimento	60
4.3.2	Argamassas bastardas	66
4.4	Influência do volume água	72
4.4.1	Argamassas de cimento	72
4.4.2	Argamassas bastardas	77
5	Modelos numéricos de análise das curvas higroscópicas	83
5.1	Modelos 1 e 2	83
5.1.1	Parametrização das curvas de cada material	83
5.1.2	Análise dos resultados dos modelos matemáticos 1 e 2	90
5.2	Modelo 3	90
5.2.1	Parametrização das curvas de cada material	91
5.2.2	Análise dos resultados dos modelos matemáticos 2 e 3	93
6	Patamares histeréticos	95
6.1	Análise de resultados	96
6.1.1	Pedra natural	96
6.1.2	Material cerâmico	96
6.1.3	Argamassas	97
6.1.4	Discussão de resultados	98
7	Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros	99
7.1	Conclusões	99
7.2	Desenvolvimentos futuros	101
7.2.1	Determinação das curvas higroscópicas	101
7.2.2	Porosimetria por intrusão de mercúrio	101
	Bibliografia	103
A	Resultados - Influência da dosagem de cimento	107
A.1	Argamassas de cimento	107
A.1.1	Grupo 2	107
A.1.2	Grupo 3	112
A.2	Argamassas bastardas	117
A.2.1	Grupo 5	117
A.2.2	Grupo 6	122
B	Resultados - Influência do volume água	129
B.1	Argamassas de cimento	129
B.1.1	Grupo B	129
B.1.2	Grupo C	134
B.2	Argamassas bastardas	139
B.2.1	Grupo E	139
B.2.2	Grupo F	144
C	Publicação - Efeitos da humidade higroscópica no comportamento térmico dos materiais	151

Índice de Figuras

2.1	Diagrama psicrométrico [14].	4
2.2	Exemplo dos valores de humidade relativa numa parede [13].	5
2.3	Esquema de princípio da descrição convencional do teor de humidade de um material (adaptada de [10]).	6
2.4	Formas básicas de isothermas de acordo com Brunauer [29].	7
2.5	Modelo genérico da curva de armazenamento de humidade em condições isotérmicas (adaptada de [11]).	8
2.6	Molécula de água [39].	9
2.7	Modelo de um poro na fase de mono-camada (adaptada de [32]).	9
2.8	Modelo de um poro na fase de multi-camada (adaptada de [32]).	10
2.9	Modelo de um poro na fase de condensação capilar (adaptada de [32]).	10
2.10	Modelo de um poro na fase sobre-higroscópica (adaptada de [32]).	11
2.11	Modelo de um poro na fase de supersaturação (adaptada de [32]).	11
2.12	Representação genérica de um processo de adsorção/desadsorção em condições isotérmicas (adaptada de [38]).	12
2.13	Modelo de um poro tipo tinteiro.	13
2.14	Processo de adsorção num poro do tipo tinteiro.	14
2.15	Processo de formação de menisco na zona D_2	14
2.16	Equilíbrio de massas de água no interior de um poro.	15
2.17	Fases do processo de desadsorção de um poro.	15
2.18	Trocas gasosas entre meniscos do mesmo poro.	16
2.19	Relação entre a HR e a germinação e proliferação de fungos (adaptada de [40])	17
2.20	Amplitude de medição de diversos métodos de porometria [33].	18
2.21	Característica molhante (H_2O) e não molhante (Hg) (adaptada de [31].)	19
2.22	Equilíbrio entre uma gota de líquido e a superfície de um sólido (adaptado de [32]).	19
2.23	Esquema do processo de molhagem de um sólido por um líquido (adaptada de [32]).	20
2.24	Curva genérica da intrusão de mercúrio no porosímetro.	21
2.25	Interpretação dos modelos histeréticos gerados nos ciclos intrusão-extrusão de mercúrio [3].	21
3.1	Amostras de materiais utilizados como isolamento	23
3.2	Amostras de materiais comuns utilizados na construção	25
3.3	Exemplos representativos das dimensões dos provetes dos materiais analisados	25
3.4	Equipamento utilizado na determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta.	26
3.5	Câmara climática Fitoclima 300.	28

3.6	Amostras de cada um dos materiais utilizados no ensaio de determinação da curva de armazenamento de humidade.	28
3.7	ISOMET 2104 e sondas utilizadas no ensaio.	30
3.8	Especificações técnicas dos acessórios ISOMET 2104 [18].	31
3.9	Influência do processo de secagem nas leituras da condutibilidade térmica.	33
3.10	Amostras de cada um dos materiais utilizados no ensaio de determinação da condutibilidade térmica.	34
3.11	Autopore IV [22].	35
3.12	Provetes utilizados no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.	36
3.13	Início do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (adaptada de [21]).	36
3.14	Esquema representativo do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (adaptada de [21]).	37
3.15	Exemplo de gráfico gerado pela relação volume cumulativo de mercúrio e os respectivos diâmetros.	39
3.16	Exemplo do gráfico gerado pelo volume incremental intrudido de mercúrio e os respectivos diâmetros.	39
3.17	Relação entre os volumes incrementais intrudido e extrudido.	40
3.18	Relação entre o volume incremental retido e o volume total intrudido.	41
3.19	Relação entre o volume incremental retido e o volume incremental intrudido para cada diâmetro.	41
4.1	Curvas higroscópicas correspondentes ao XPS e ao EPS.	46
4.2	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - XPS e EPS.	47
4.3	Curvas higroscópicas correspondentes ao aglomerado de cortiça e à lã-mineral.	48
4.4	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - Aglomerado de cortiça e lã mineral.	49
4.5	Curvas higroscópicas correspondentes à pedra natural.	49
4.6	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - pedra calcária.	50
4.7	Curvas higroscópicas correspondentes ao tijolo furado e ao tijolo refractário.	51
4.8	Distribuição de diâmetros de poros para uma amostra de tijolo furado e uma de tijolo refractário.	51
4.9	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para os materiais cerâmicos analisados.	52
4.10	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para uma amostra de tijolo furado e uma de tijolo refractário.	53
4.11	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para uma amostra de tijolo furado e uma de tijolo refractário.	53
4.12	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - materiais cerâmicos.	54
4.13	Curva higroscópica correspondente a uma amostra de estuque.	55
4.14	Distribuição de diâmetros de poros para uma amostra de estuque.	55
4.15	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para uma amostra estuque.	56
4.16	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para uma amostra de estuque.	56
4.17	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para o estuque.	57
4.18	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - estuque.	57
4.19	Curvas higroscópicas correspondentes ao betão celular autoclavado.	58
4.20	Distribuição de diâmetros de poros para uma amostra de betão celular.	58

4.21	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para uma amostra betão celular autoclavado.	59
4.22	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para uma amostra betão celular.	59
4.23	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - betão celular autoclavado.	60
4.24	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do Grupo 1.	61
4.25	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do Grupo 1.	61
4.26	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do Grupo 1.	62
4.27	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do Grupo 1.	63
4.28	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do Grupo 1.	64
4.29	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do Grupo 1.	65
4.30	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do Grupo 4.	66
4.31	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do Grupo 4.	67
4.32	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do Grupo 4.	68
4.33	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de bastardas do Grupo 4.	69
4.34	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de bastardas do Grupo 4.	70
4.35	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de bastardas do Grupo 4.	71
4.36	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do Grupo A.	72
4.37	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do Grupo A.	73
4.38	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do Grupo A.	74
4.39	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do Grupo A.	75
4.40	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do Grupo A.	76
4.41	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do Grupo A.	77
4.42	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do Grupo D.	78
4.43	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do Grupo D.	78
4.44	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do Grupo D.	79
4.45	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas bastardas do Grupo D.	80
4.46	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas bastardas do Grupo D.	81
4.47	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas bastardas do Grupo D.	82
5.1	Resultados experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o XPS.	86
5.2	Resultados experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o betão celular.	87

5.3	Pormenor da parameterização (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o betão celular.	87
5.4	Resultados experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o tijolo cerâmico furado.	88
5.5	Pormenor da parameterização (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o tijolo furado.	89
5.6	Resultados experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para a argamassa bastarda A14.	90
5.7	Resultados experimentais e parametrizações (modelos 2 e 3) das curvas higroscópicas para a argamassa bastarda A14.	93
6.1	Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção (adaptada de [13]).	95
6.2	Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção para a pedra natural.	96
6.3	Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção para o tijolo refractário.	97
6.4	Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção para o tijolo furado.	97
6.5	Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção para a argamassa A1.	98
6.6	Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção para a argamassa A14.	98
A.1	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do grupo 2.	107
A.2	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do grupo 2.	108
A.3	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo 2.	109
A.4	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do grupo 2.	110
A.5	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do grupo 2.	111
A.6	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do grupo 2.	112
A.7	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do grupo 3.	112
A.8	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do grupo 3.	113
A.9	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo 3.	114
A.10	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do grupo 3.	115
A.11	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do grupo 3.	116
A.12	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do grupo 3.	117
A.13	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do grupo 5.	117
A.14	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do grupo 5.	118
A.15	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo 5.	119
A.16	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas bastardas do grupo 5.	120

A.17	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas bastardas do grupo 5.	121
A.18	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas bastardas do grupo 5.	122
A.19	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do grupo 6.	122
A.20	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do grupo 6.	123
A.21	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo 5.	124
A.22	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas bastardas do grupo 6.	125
A.23	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas bastardas do grupo 6.	126
A.24	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas bastardas do grupo 6.	127
B.1	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do grupo B.	129
B.2	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do grupo B.	130
B.3	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo B.	131
B.4	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do grupo B.	132
B.5	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do grupo B.	133
B.6	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do grupo 2.	134
B.7	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do grupo C.	134
B.8	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do grupo C.	135
B.9	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo C.	136
B.10	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do grupo C.	137
B.11	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do grupo C.	138
B.12	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do grupo C.	139
B.13	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do grupo E.	139
B.14	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do grupo E.	140
B.15	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo E.	141
B.16	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas bastardas do grupo E.	142
B.17	Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas bastardas do grupo E.	143
B.18	Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas bastardas do grupo E.	144
B.19	Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do grupo F.	144
B.20	Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do grupo F.	145
B.21	Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo F.	146
B.22	Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas bastardas do grupo F.	147

B.23 Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas bastardas do grupo F.	148
B.24 Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas bastardas do grupo F.	149

Índice de Tabelas

3.1	Composição dos varios tipos de argamças analisadas.	24
3.2	Valores de λ segundo o ITE50 e respectivas sondas utilizadas nos materiais analisados. .	32
3.3	Exemplo de dados extraídos do <i>software</i> AutoPore TM 9500.	38
4.1	Reagrupamentos para análise da influência do volume de cimento.	43
4.2	Reagrupamentos para análise da influência do volume de água.	44
4.3	Resultados experimentais de ρ , massa específica e P_{ab}	45
5.1	Parâmetros dos modelos 1 e 2 para a fase de adsorção.	84
5.2	Parâmetros dos modelos 1 e 2 para a fase de desadsorção.	85
5.3	Valores experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o XPS.	86
5.4	Valores experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o betão celular.	87
5.5	Valores experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o tijolo cerâmico furado.	88
5.6	Valores experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para argamassa bastarda A14.	89
5.7	Parâmetros do modelo 3 para a fase de adsorção.	91
5.8	Parâmetros do modelo 3 para a fase de desadsorção.	92
5.9	Valores experimentais e parametrizações (modelos 2 e 3) das curvas higroscópicas para argamassa bastarda A14.	93
6.1	Lista de materiais analisados para diferentes máximos de teores de água.	96

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

<i>Ads</i>	Adsorção
<i>Desad</i>	Desadsorção
<i>HR</i>	Humidade Relativa
<i>EPS</i>	Poliestireno expandido
<i>XPS</i>	Poliestireno extrudido
<i>MIP</i>	Mercury Intrusion Porosimetry
<i>a/L</i>	Relação água-ligante

Siglas

ASTM	American Society for Testing and Materials
DEC	Departamento de Engenharia Civil
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologias
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
ISO	International Organization for Standardization
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
UNL	Universidade Nova de Lisboa

Símbolos

λ	Condutibilidade térmica
-----------	-------------------------

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações gerais

A água desempenha um papel de extrema relevância na degradação dos materiais e no conforto higrotérmico dos edifícios, na medida em que funciona como catalisador de numerosas anomalias [25], afectando directamente algumas propriedades dos materiais, tais como, resistência mecânica, retracção-dilatação e condutibilidade térmica [19].

A grande maioria dos materiais utilizados na construção apresenta características higroscópicas, ou seja, quando colocados num ambiente onde ocorra variação de humidade dá-se a variação dos respectivos teores de água [7].

O excesso de humidade nos materiais pode levar ao aparecimento de microorganismos, tais como, bolor, fungos e bactérias [44], [24]. Estes fenómenos têm consequências negativas, as quais se reflectem na qualidade do ar interior dos edifícios, podendo originar dificuldades respiratórias, irritações cutâneas e alergias por parte dos utilizadores [35].

Devido aos factores anteriormente mencionados, torna-se de extrema importância incrementar o nível de conhecimento do comportamento dos materiais e soluções construtivas quando sujeitos a diferentes condições ambientais, indo para além dos aspectos comuns que geralmente são tidos em conta. É particularmente relevante avaliar o modo como os materiais correntemente aplicados na execução das soluções construtivas comuns se comportam quando sujeitos à influência das variações normais da humidade relativa.

1.2 Objectivo e metodologia

O principal objectivo desta dissertação é o estudo da influência dos fenómenos higroscópicos em materiais correntes. Nesse sentido, pretende analisar-se as curvas higroscópicas em condições isotérmicas (23 °C) de uma lista de materiais comumente utilizados em construção, tais como, argamassas, pedra natural, isolantes térmicos, material cerâmico, estuque e betão celular autoclavado. Para tal sujeitaram-se os materiais a vários patamares de humidade relativa que variaram entre 40 e 95%.

Com o intuito de complementar este estudo, foi analisada a evolução da condutibilidade térmica com a variação da humidade relativa para cada um dos materiais. Foi ainda feita uma análise à estrutura porosa das amostras através de um ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está organizado em 7 capítulos. No capítulo 2 abordam-se aspectos sobre a humidade em materiais porosos, essenciais para a compreensão deste estudo. No capítulo 3 procede-se à descrição dos materiais bem como dos ensaios abordados na actividade experimental. No capítulo 4 são expostos e analisados os resultados obtidos. No capítulo 5 apresentam-se três modelos matemáticos que têm como objectivo a previsão do comportamento higroscópico dos materiais. No capítulo 6 apresenta-se a influência do valor máximo de humidade relativa a que um dado material está sujeito e o consequente efeito histerético. Por ultimo, no capítulo 7, apresentam-se as conclusões do estudo bem como algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Humidade em materiais porosos

2.1 Ar húmido

O ar húmido consiste numa mistura de ar seco e vapor de água. Assumindo que as duas partes se comportam como gases ideais é possível aplicar a seguinte fórmula:

$$PV = mRT \quad (2.1)$$

Onde T é a temperatura medida em Kelvin e as variáveis P, V, m e R são características de cada um dos intervenientes, em que P representa a pressão parcial (Pa), m a massa (kg), V o volume e R é a constante dos gases (J/kg.K). R toma para o ar seco o valor de 287,055 e para o vapor de água 462,4. Sendo ρ a concentração de cada uma das partes traduzida por:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

Podem escrever-se as seguintes equações, nas quais o índice S representa o ar seco e V o vapor de água:

$$\rho_s = \frac{P_s}{R_s.T} \quad (2.3)$$

$$\rho_v = \frac{P_v}{R_v.T} \quad (2.4)$$

Sabendo que nenhum dos constituintes do ar seco reage com o vapor de água pode definir-se a pressão total do ar húmido como a soma das pressões parciais das parcelas intervenientes, dada por:

$$P = P_s + P_v \quad (2.5)$$

Uma vez que as duas partes, líquida e gasosa, coexistem em equilíbrio, existe um valor máximo para a quantidade de vapor de água presente no ar, ao qual se dá o nome de limite de saturação. Em termos de

pressão este valor pode ser descrito como pressão de saturação, $P_{v,sat}$. Este valor depende da temperatura do ar (Hens, 1991) e pode ser calculado através da expressão 2.6, a qual é válida para temperaturas entre 0°C e 80°C

$$P_{v,sat} = e^{\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T+273,15-37,58}\right)} \quad (2.6)$$

2.1.1 Humidade Relativa

A humidade relativa é dada em percentagem e, como o nome indica, consiste na relação entre a quantidade de vapor de água que efectivamente existe numa determinada massa de ar (ν), para uma determinada temperatura, pela quantidade máxima de vapor de água que essa massa suportaria (ν_s). Este valor também pode ser expresso com base no quociente entre a pressão de vapor P_v e a pressão correspondente ao limite de saturação $P_{v,sat}$:

$$HR = \frac{\nu}{\nu_s} = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \times 100 \quad (2.7)$$

Como se pode ver através da eq. 2.6, a humidade relativa varia inversamente com o aumento da temperatura, isto é, para uma mesma massa de ar um aumento da temperatura implica forçosamente uma diminuição da humidade relativa. Esta informação pode ainda ser apresentada em forma de gráfico através do diagrama psicrométrico ilustrado na fig. 2.1 que apresenta em abcissas a temperatura do ar, em ordenadas as pressões parciais do vapor e um conjunto de curvas de humidade relativa [14].

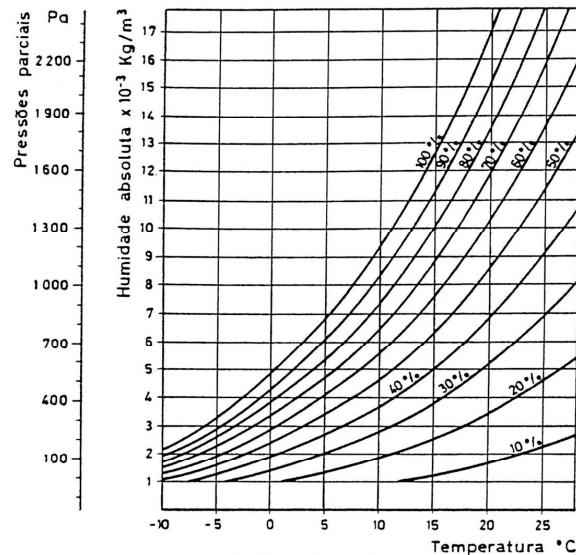


Fig. 2.1: Diagrama psicrométrico [14].

2.1.2 Diagrama de Glaser

O método de Glaser baseia-se na lei de Fick [13] e consiste num processo de análise do risco de ocorrência de condensações superficiais e internas em soluções construtivas tendo como base os valores das pressões de vapor de água. Sempre que num dado ponto do interior do elemento construtivo a pressão parcial iguala a pressão de saturação correspondente à temperatura nesse ponto a humidade relativa atinge 100%, como se constata da eq. 2.7, ocorrendo assim condensações.

Um exemplo de uma análise pelo método de Glaser é apresentado na fig. 2.2.

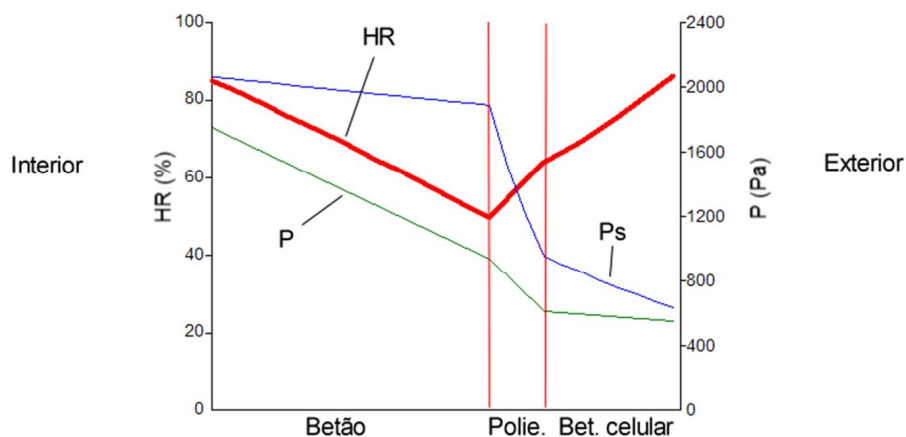


Fig. 2.2: Exemplo dos valores de humidade relativa numa parede [13].

Da análise da fig. 2.2 constata-se que, apesar de em nenhum ponto ocorrerem condensações, deve referir-se os elevados valores para a humidade relativa na generalidade dos pontos do interior influenciando assim a condutibilidade térmica da solução construtiva. Deste modo poderão ocorrer eventuais condensações superficiais ou internas em consequência da simples difusão de vapor de água através de um elemento construtivo.

2.1.3 Teor de água

De acordo com a norma ISO 9346 [16] o teor de água pode ser expresso de varias formas, sendo que neste texto adopta-se a relação entre a massa de água presente numa dada amostra e a sua massa no estado seco. O teor de água é representado pela letra w , expresso em kg/kg e pode ser calculado através da expressão:

$$w = \frac{(m_h - m_s)}{m_s} \quad (2.8)$$

onde m_h represente a massa húmida e m_s a massa seca do material em análise.

Esta grandeza pode ainda ser expressa pela eq. 2.9, designando-se teor de água ponderal (U), onde V representa o volume da amostra seca dada em m^3 .

$$U = \frac{(m_h - m_s)}{V} \quad (2.9)$$

Relacionando a densidade da amostra seca, ρ_s (kg/m^3), com a eq. 2.8, o teor de água anterior pode também ser representado da seguinte forma:

$$U = w \times \rho_s \quad (2.10)$$

Dividindo a eq. 2.10 pela massa volúmica da água, dada por ρ_w , obtém-se o terceiro e último modo de representar o teor de água, o chamado teor de água volúmico, representado por θ e expresso em m^3/m^3 ;

$$\theta = w \times \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (2.11)$$

Como referido anteriormente, neste texto considera-se o teor em água calculado através da eq. 2.8. Este parâmetro varia entre zero, quando a humidade relativa é nula, e o teor de água máximo (w_{max}). Importa referir que este nível de teor de água dificilmente é atingido, devido à existência de pequenas bolsas de ar no interior dos poros. Assim, toma-se como valor máximo o teor de água capilar (w_{cap}), parâmetro que representa o valor máximo de humidade quando o material está em contacto com a água no estado líquido.

Existe, ainda, o chamado teor de água crítico (w_{cr}), valor que corresponde ao teor mínimo de água para o qual a transferência de humidade ocorre em regime líquido, isto é, quando se entra na região capilar. Este princípio encontra-se esquematizado na figura 2.3.

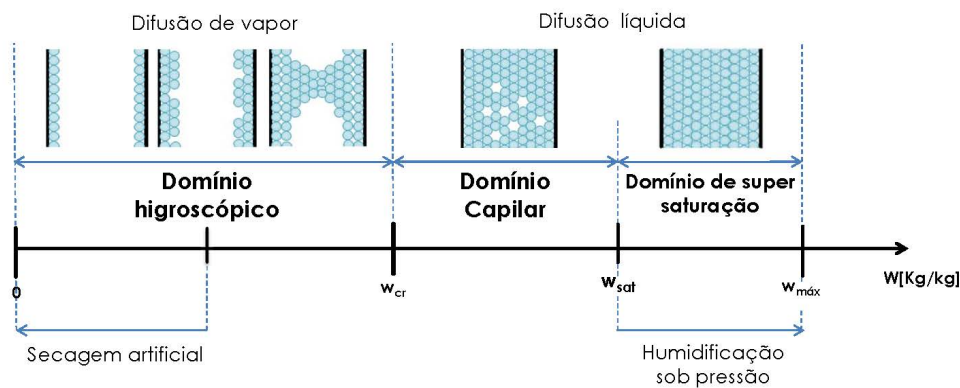


Fig. 2.3: Esquema de princípio da descrição convencional do teor de humidade de um material (adaptada de [10]).

2.1.4 Curva de armazenamento de humidade

A grande maioria dos materiais utilizados na construção apresentam um comportamento hidrófilo, ou seja, têm tendência a atrair moléculas de água as quais se depositam ao longo da superfície de cada material.

A curva de armazenamento de humidade consiste num gráfico cujo eixo das ordenadas representa o teor de água (W) enquanto no eixo das abcissas estão definidos os valores de humidade relativa entre zero e 100%.

Na literatura é possível encontrar diversos tipos de curvas, que descrevem o armazenamento de humidade em situações isotérmicas. A maior parte destes modelos pode ser classificado numa das cinco ou seis classes originalmente formuladas por Brunauer, Emmet e Teller (BET) ilustradas na fig. 2.4 [29].

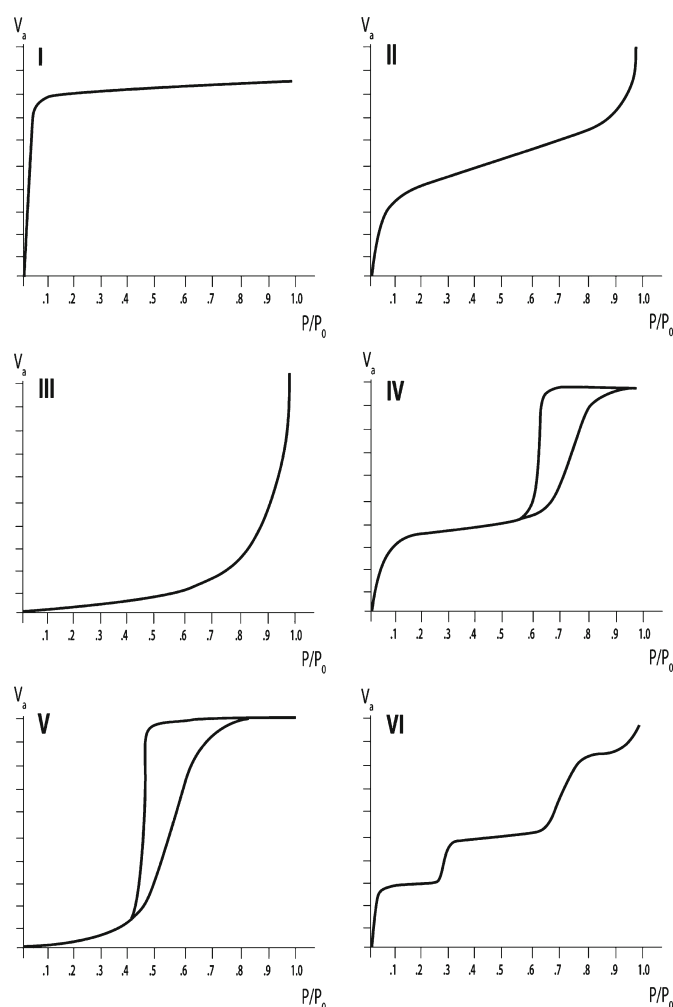


Fig. 2.4: Formas básicas de isotermas de acordo com Brunauer [29].

Cada tipo está relacionado com a porosidade envolvida. Para materiais de construção porosos, este gráfico apresenta uma forma em "S" [20] ou seja uma curva do tipo 2, como se pode constatar através da fig. 2.5.

Inicialmente, com o aumento da humidade relativa, o declive é ligeiramente acentuado, observando-se posteriormente uma diminuição e um novo incremento na fase final.

Com o aumento do teor de água é possível distinguir duas zonas: a de domínio higroscópico e a de domínio capilar. O ponto de intersecção teórico destas duas regiões denomina-se teor de água crítico.

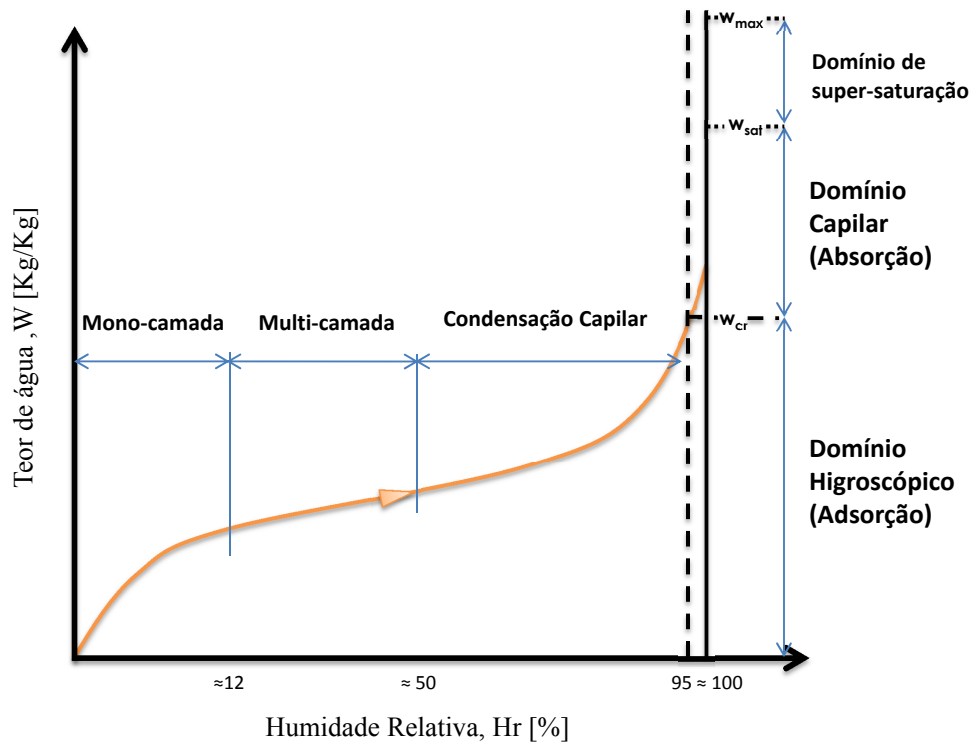


Fig. 2.5: Modelo genérico da curva de armazenamento de humidade em condições isotérmicas (adaptada de [11]).

2.1.5 Região higroscópica

A região higroscópica ocorre para valores de humidade relativa entre 0% e 95%. Como referido anteriormente, em termos de teor de água, esta zona é limitada superiormente pelo teor de água crítico (w_{cr}).

No regime higroscópico as transferências de humidade ocorrem por difusão gasosa e como ilustrado na fig. 2.5 com o aumento da humidade relativa é possível fazer a distinção de três zonas distintas:

- Mono-camada/mono-molécula;
- Multi-camada/multi-molécula;
- Condensação capilar.

De modo a facilitar a explicação dos mecanismos intervenientes em cada uma das fases, está representada na fig. 2.6 uma molécula de água, na qual se pode constatar o facto do centroide das duas cargas positivas não coincidir com o das duas cargas negativas. Esta diferente distribuição de cargas origina uma polaridade, fazendo com que a molécula de água funcione como um pequeno íman [39].

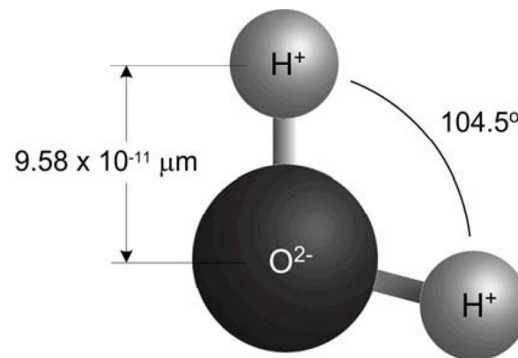


Fig. 2.6: Molécula de água [39].

Mono-camada

A mono-camada ocorre para valores de humidade relativa relativamente baixos - entre 0% e aproximadamente 12% - e é caracterizada pela adesão de uma fina camada de moléculas de água às paredes dos poros do material (fig. 2.7) [38]. Esta fixação deve-se à acção das forças intermoleculares descritas anteriormente na interface solido-líquido.

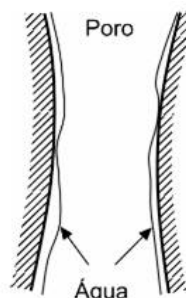


Fig. 2.7: Modelo de um poro na fase de mono-camada (adaptada de [32]).

Multi-camada

Com o aumento da humidade relativa até um valor de aproximadamente 50% ocorre a sobreposição de múltiplas camadas (fig. 2.8). Este fenómeno, análogamente à situação anterior, ocorre devido a forças intermoleculares, porém, neste caso, na interface líquido-líquido.

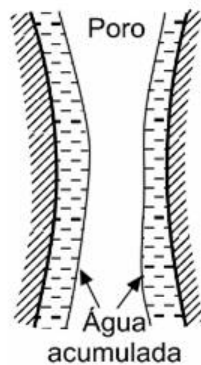


Fig. 2.8: Modelo de um poro na fase de multi-camada (adaptada de [32]).

Condensação capilar

Até sensivelmente 95% de humidade relativa está definida a região de condensação capilar. Esta região caracteriza-se pela união entre multicamadas de paredes opostas do poro, dando assim origem à formação de meniscos (fig. 2.9), cuja acção é explicada na Secção 2.1.8.

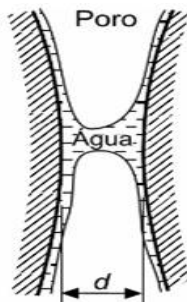


Fig. 2.9: Modelo de um poro na fase de condensação capilar (adaptada de [32]).

2.1.6 Região capilar

Para níveis de humidade relativa superiores a 95% a difusão de humidade ocorre por meio líquido. Nesta região a curva de armazenamento de humidade apresenta um declive bastante acentuado aproximando-se assim da saturação total do material. Este processo pode ser descrito em duas partes: região sobre-higroscópica e região de supersaturação [20].

Região sobre-higroscópica

Entre 95% e 98% de humidade relativa ocorre a saturação parcial dos poros e nesta fase existem ainda pequenas bolsas de ar no interior dos mesmos (fig. 2.10).

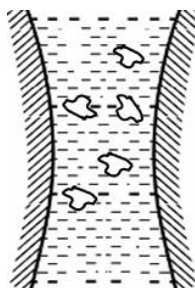


Fig. 2.10: Modelo de um poro na fase sobre-higroscópica (adaptada de [32]).

Região de supersaturação

Para valores entre 98% e 100% de humidade relativa ocorre a saturação total do material (fig. 2.11).

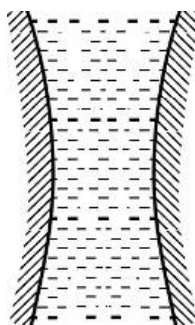


Fig. 2.11: Modelo de um poro na fase de supersaturação (adaptada de [32]).

No entanto, no caso de materiais porosos e em condições normais de pressão, a ascensão a este nível de saturação por parte dos materiais é praticamente impossível devido à presença das pequenas bolsas de ar formadas na fase sobre-higroscópica. Uma melhor caracterização deste processo pode ser feita para materiais com comportamento hidrófobo, tais como alguns isolantes. Uma vez que a porosidade aberta destes materiais é bastante próxima de zero diminuindo a ocorrência e aprisionamento de bolsas de ar [38].

2.1.7 Adsorção e absorção

Absorção

A absorção é fenómeno que ocorre acima dos 95% e portanto situa-se na região capilar, onde a difusão de humidade ocorre por difusão de água na sua forma líquida. A absorção implica a incorporação do volume de uma dada amostra por parte de outra substância, como por exemplo a água.

Adsorção

O processo de adsorção refere-se à retenção superficial ou adesão de moléculas de água à superfície dos materiais [1]. Este fenómeno desempenha um papel preponderante no domínio higroscópico, ou seja, entre 0% e 95% de humidade relativa. Como se viu anteriormente, a adsorção é uma consequência da energia superficial dos materiais, ocorrendo devido a interações electrostáticas entre moléculas dos materiais envolventes no processo [2].

Dado que o incremento de humidade relativa origina a adsorção, o processo inverso motiva a desadsorção. Idealmente o traçado do gráfico de ambos os fenómenos para um mesmo material deveria ser coincidente. No entanto, para a maioria dos materiais de construção este fenómeno não se verifica (fig. 2.12), ocorrendo histerese. De salientar que a histerese é tanto mais evidente quanto maior o valor de teor de água aquando o início da desadsorção do material.

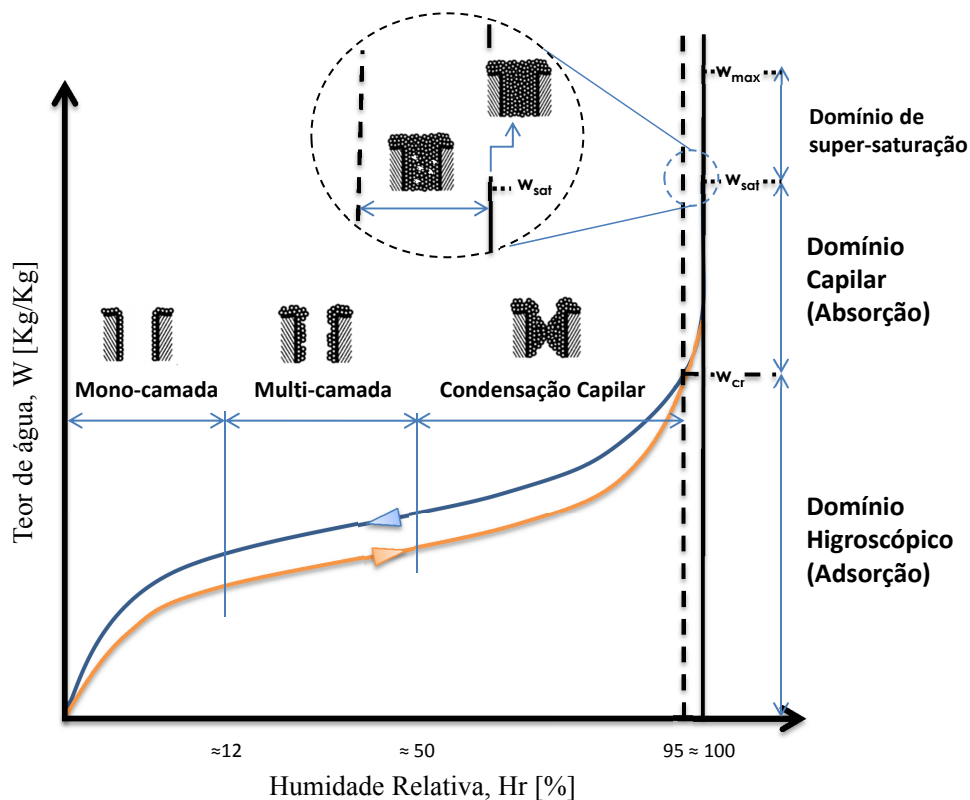


Fig. 2.12: Representação genérica de um processo de adsorção/desadsorção em condições isotérmicas (adaptada de [38]).

2.1.8 Fenómeno de histerese entre os processos de adsorção e desadsorção

A razão desta histerese não se encontra ainda bem definida, sendo contudo admitido que deverá resultar da estrutura porosa dos materiais, mais concretamente da porometria e da morfologia dos poros. Este

fenómeno foi alvo, nas últimas décadas, de um elevado interesse por parte de diversos autores, existindo assim diversos estudos neste campo presentes na bibliografia deste trabalho [9],[11],[23].

Como referido anteriormente, a condensação capilar em materiais porosos é geralmente acompanhada pelo efeito histerético entre os processos de adsorção e desadsorção e, de acordo com os ensaios experimentais levados a cabo por Page *et al.* [27] e Ravikovitch *et al.* [34], durante os processos verifica-se a formação de bolhas de ar no interior dos poros - nucleação. Com base nestes factos e assumindo que a rede porosa dos materiais é constituída por um labirinto de poros interligados e que nos quais ocorrem variações de diâmetro, os mecanismos de transferência de humidade são processos bastante complexos e dinâmicos.

De modo a facilitar a explicação deste fenómeno está representado na fig. 2.13 um poro tipo tinteiro, que servirá de modelo na representação dos mecanismos de adsorção e de desadsorção.

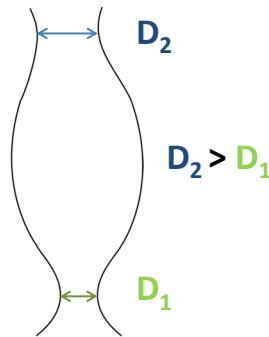


Fig. 2.13: Modelo de um poro tipo tinteiro.

A lei de Kelvin permite relacionar duas entidades que à partida pareceriam distintas: os raios dos poros e o valor da humidade relativa para o qual ocorre a saturação. Com efeito, a equação que a traduz (eq. 2.12) relaciona a humidade relativa para a qual ocorre saturação com as características do menisco existente, definido em termos da sua curvatura e das características do fluido e das superfícies. Nessa equação HR representa a humidade relativa, ρ_w a massa volúmica da água, σ a tensão superficial do fluido, θ o ângulo de contacto (que para a água é assumido como zero), r o raio médio do poro, R a constante dos gases e T a temperatura absoluta.

$$HR = e^{\left(-\frac{2\sigma \cos\theta}{r\rho_w RT}\right)} \quad (2.12)$$

Após análise da eq. 2.12 verifica-se que o valor de HR para a qual ocorre condensação no poro é tanto menor quanto menor o valor do raio do poro. Deste modo o processo de adsorção pode ser representado de acordo com a fig. 2.14, na qual se pode constatar que a formação de meniscos ocorre inicialmente na zona do poro com menor raio (zona D1 da fig. 2.13).

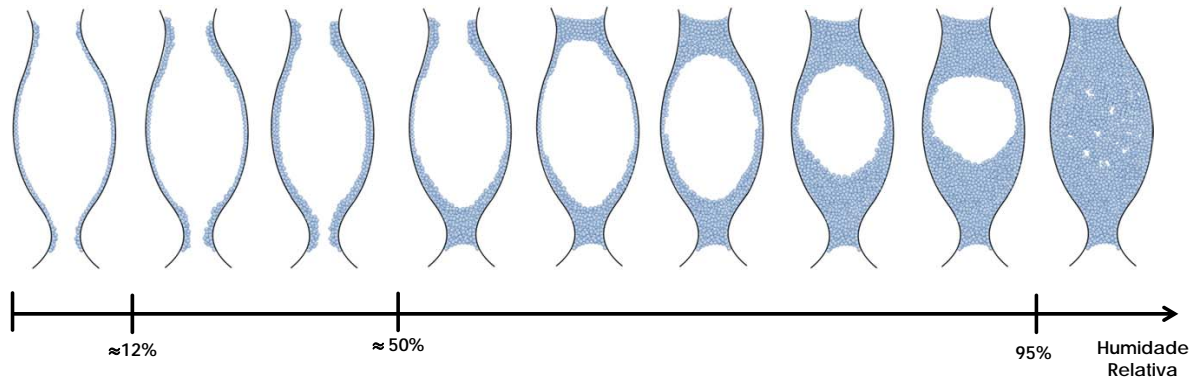


Fig. 2.14: Processo de adsorção num poro do tipo tinteiro.

Como se pode observar na fig. 2.14, para HR superior a 50% - fase de condensação capilar - dá-se a formação de meniscos nas duas zonas mais estreitas do poro.

A formação do menisco na zona D_2 ocorre quando a ascensão de água na região D_1 atinge a zona cujo diâmetro do poro iguala o diâmetro da zona D_2 (fig. 2.15).

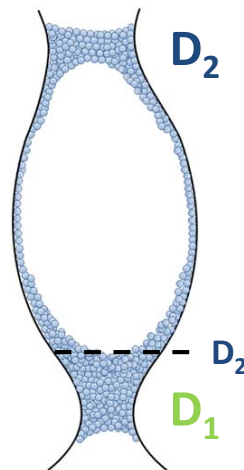


Fig. 2.15: Processo de formação de menisco na zona D_2 .

Relacionando a equação de Kelvin (eq. 2.12) com a eq. 2.7 chega-se à conclusão que a pressão sobre um menisco com uma dada curvatura é tanto menor (comparativamente com a pressão de saturação à temperatura existente) quanto menor for o raio do poro onde o menisco ocorra.

$$P_v = P_{v,Sat} \times e^{\left(-\frac{2\sigma \cos \theta}{r \rho_w RT}\right)} \quad (2.13)$$

Deste modo, com base na fig. 2.15 e sabendo que os raios dos meniscos formados são iguais, as pressões dadas pela eq. 2.13 serão também iguais e, assim, o equilíbrio das duas massas de água ocorrerá por difusão de água líquida até a total saturação do poro.

O processo de desadsorção ocorre de modo idêntico ao de adsorção. Contudo, apresenta algumas diferenças importantes a seguir explicitadas.

A sucção, S , num dado poro é dada pela eq. 2.14. Por esta equação, verifica-se que o fenómeno de sucção é tanto maior quanto menor for o raio do poro,

$$S = \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (2.14)$$

Este processo está representado na figura 2.16 e pode ser constatado o facto de que de modo a se poder estabelecer um equilíbrio físico, a massa de água mobilizada pela sucção gerada pela força F_1 é maior do que a massa movida pela força F_2 .

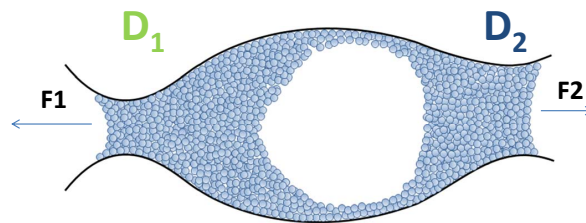


Fig. 2.16: Equilíbrio de massas de água no interior de um poro.

Assumindo que a certa altura os meniscos se encontram fisicamente separados, o único meio de transferência de humidade é por difusão de vapor, e assim o mecanismo de desadsorção pode ser representado pela fig. 2.17.

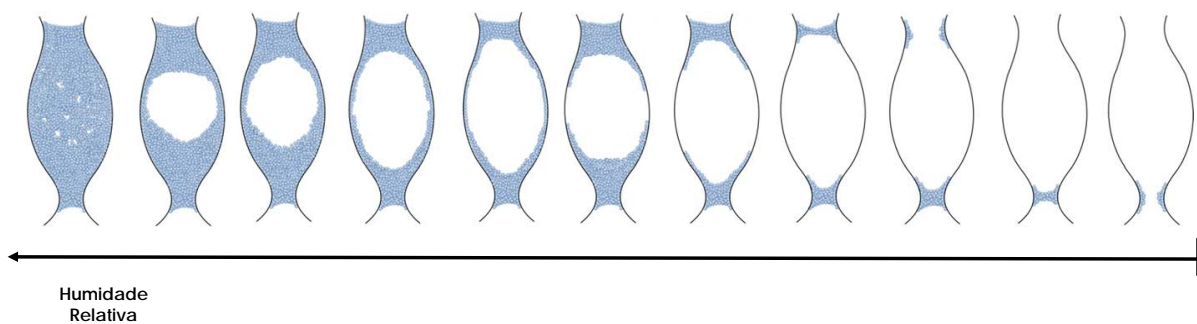


Fig. 2.17: Fases do processo de desadsorção de um poro.

De acordo com a eq. 2.13, a pressão sobre o menisco do poro de menor raio (D_1) é inferior à pressão gerada sobre o menisco da zona D_2 , logo, por equilíbrio físico, a difusão de vapor ocorre da zona D_2 para a zona D_1 (fig. 2.18). Esta troca de vapor de água entre meniscos do mesmo poro, durante a fase de desadsorção, pode justificar o fenómeno histerético que ocorre entre os processos de adsorção e desadsorção.

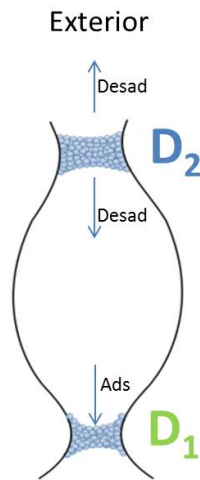


Fig. 2.18: Trocas gasosas entre meniscos do mesmo poro.

2.2 Influência do teor de humidade no conforto dos edifícios

2.2.1 Salubridade

Problemas causados pela qualidade do ar interior dos edifícios são reconhecidos como factores de risco para a saúde dos utilizadores. A qualidade do ar interior toma particular importância na medida em que, as pessoas passam grande parte das suas vidas no interior de edifícios. Em casa, lares, hospitais a qualidade do ar afecta grupos populacionais que apresentam maiores vulnerabilidades [25]. Este facto está directamente ligado com o teor de água dos materiais, na medida em que os materiais sujeitos a níveis altos de humidade durante longos períodos de tempo, têm tendência à formação de colónias de microorganismos, tais como fungos e bactérias.

Na figura 2.19 ilustra-se a relação entre a humidade relativa e a germinação e proliferação de fungos.

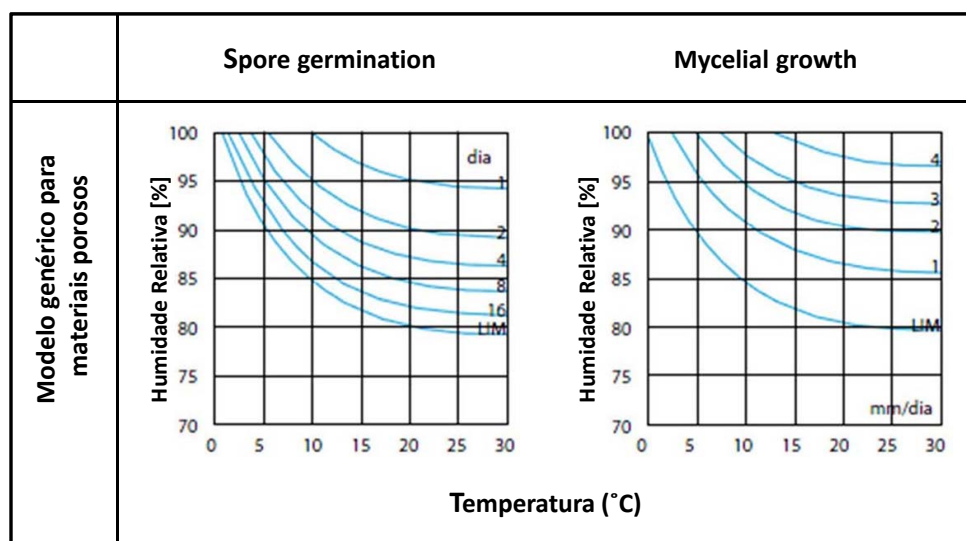


Fig. 2.19: Relação entre a HR e a germinação e proliferação de fungos (adaptada de [40])

Este aparecimento e consequente proliferação de microorganismos poderá levar ao "síndrome do edifício doente", termo utilizado na literatura que descreve a gama de sintomas, tais como dificuldades respiratórias, irritação ocular, irritações cutâneas e alergias, que podem ser despoletadas nos utentes de edifícios afectados [35].

2.3 Condutibilidade térmica

A característica térmica mais importante em materiais de construção é a condutibilidade térmica λ [W/m.K] [5]. É uma característica própria de cada material, que traduz a forma como o material se deixa atravessar pelo calor, podendo, ainda, ser definida como a quantidade de calor que atravessa a unidade de espessura do material, por unidade de área, por unidade de espessura de material, por unidade de diferença de temperatura [13].

Para materiais secos a condutibilidade térmica apresenta uma relação directa com a porosidade dos materiais, sendo tanto menor quanto maior o volume de poros na amostra. Analisando um dado material esta grandeza pode ser relacionada com o respectivo teor de água sendo os valores de λ tanto maiores quanto maior o teor de água. Poderá, no entanto, ocorrer que entre materiais diferentes, um com teor de água superior apresente menor valor de condutibilidade térmica quando comparado com um com menor teor de água e vice-versa. Este fenómeno pode ser explicado pela presença de um maior ou menor volume de poros fechados nas amostras, sendo que este tipo de porosidade desempenha um papel essencial num bom comportamento térmico de um dado material. Deve referir-se ainda que a determinação da condutibilidade térmica dos materiais é feita em condições higrotérmicas padronizadas de 50% de humidade relativa e 23 °C [13].

2.4 Porometria

Para materiais aplicados na construção de edifícios as curvas de adsorção/desadsorção são significativamente influenciadas pela sua estrutura porosa, devido a esta característica desempenhar um papel preponderante na capacidade de armazenamento de humidade dos materiais. Torna-se assim de extrema importância o estudo das características dos materiais, tais como porometria e morfologia dos poros [19].

Existem vários métodos de análise desta grandeza: medições através de técnicas de adsorção de um gás inerte, nomeadamente o Nitrogénio; Termoporometria; Porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP); Nuclear Magnetic Resonance [28], microscopia óptica e microscopia electrónica. Na fig. 2.20 apresentam-se os limites de medição de poros utilizados com alguns dos métodos anteriormente referidos.

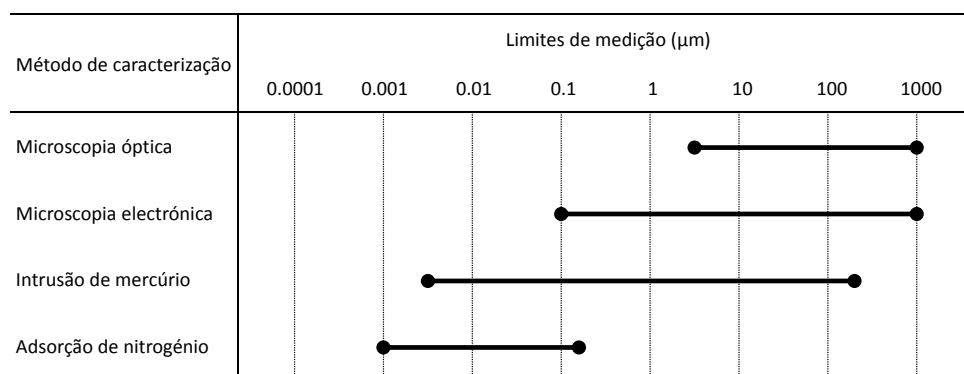


Fig. 2.20: Amplitude de medição de diversos métodos de porometria [33].

A ressonância magnética é um método menos convencional quando comparado com os restantes, no entanto apresenta como grandes vantagens o facto de não ser destrutivo e de não necessitar que o material se encontre seco no início do ensaio. Estas características possibilitam a elaboração de sucessivas análises do mesmo provete, estudando assim variações da sua estrutura porosa ao longo do tempo. Outro aspecto que torna a técnica NMR num método bastante interessante prende-se pelo facto de, através de MRI (Magnetic Resonance Imaging) ser possível a análise do teor de água das amostras, sendo o método mais utilizado o SPI (Single Point Imaging) proposto por Emid e Creighton [6].

2.4.1 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Devido à disponibilidade de equipamento adequado optou-se, nesta dissertação, pela utilização do método de porosimetria por intrusão de mercúrio. A utilização deste método como forma de obter informação sobre a estrutura porosa dos materiais, nomeadamente distribuição dos poros, a área de superfície e a massa volúmica e porosidade remonta aos anos vinte e foi da autoria de Washburn [43]. Este método consiste na injeção de mercúrio em materiais secos e registo das pressões exercidas, bem como do volume de intrusão [8].

Devido às elevadas pressões a que as amostras em análise são sujeitas durante o ensaio, nem todos os materiais podem ser analisados. Como se verá na Secção 3.2.4, os resultados obtidos durante o procedimento experimental baseiam-se na variação de volume de acordo com as respectivas variações de pressão, assim, materiais resilientes poderão gerar resultados incoerentes.

O princípio experimental baseia-se essencialmente no facto de, para a maioria dos materiais utilizados na construção, o mercúrio apresentar, para a pressão atmosférica, um comportamento de um líquido não molhante. Esta característica traduz-se na configuração adquirida por uma gota em equilíbrio na superfície de um dado material, mais concretamente no ângulo de contacto entre a gota e a superfície (fig 2.21).

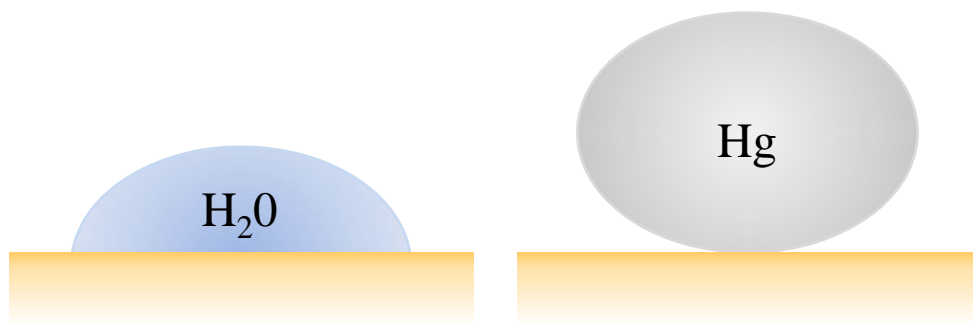


Fig. 2.21: Característica molhante (H_2O) e não molhante (Hg) (adaptada de [31].)

O modo como um determinado líquido em equilíbrio actua sobre uma dada superfície pode ser representada pela relação das energias entre diferentes interfaces, dada pela equação de Young (Eq. 2.15):

$$\cos(\theta) = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (2.15)$$

Onde γ_{SV} representa a energia da superfície sólido-vapor, γ_{SL} a tensão interfacial sólido-líquido e γ_{LV} a tensão interfacial líquido-vapor (fig2.22).

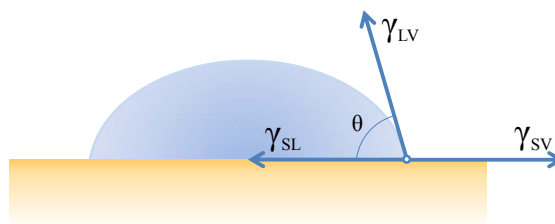


Fig. 2.22: Equilíbrio entre uma gota de líquido e a superfície de um sólido (adaptado de [32]).

Deste modo, é possível classificar um líquido como molhante ou não molhante em função do valor do ângulo, considerando-se molhante se $\theta < 90^\circ$ e não molhante se $\theta > 90^\circ$ (fig 2.23).

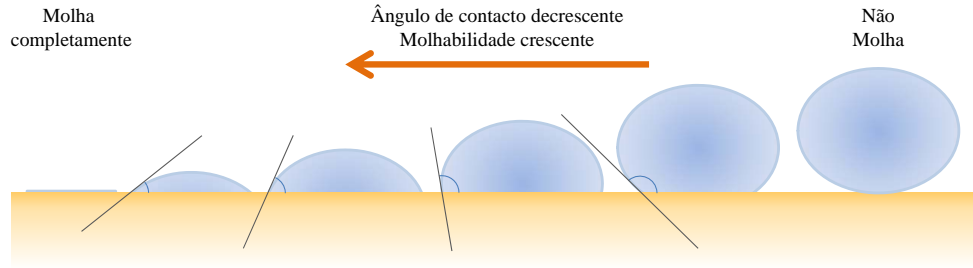


Fig. 2.23: Esquema do processo de molhagem de um sólido por um líquido (adaptada de [32]).

Quando o mercúrio é colocado em contacto com uma superfície sofre repulsão pelo facto de apresentar um comportamento não molhante e não penetra nos poros. Para que tal ocorra, deve ser aplicada uma força exterior que supere a sua tensão superficial, dada pela eq. 2.16 onde D é o diâmetro do poro, P a pressão instaurada:

$$F_{ext} = \frac{\pi D^2 P}{4} \quad (2.16)$$

Assumindo uma geometria cilíndrica para a estrutura porosa, a força (F) pela qual o mercúrio resiste à penetração no poro é dada pela eq. 2.17:

$$F = -\pi \cdot \gamma \cdot \cos(\theta) \quad (2.17)$$

γ representa a tensão superficial do mercúrio, e θ tem o mesmo significado explicado anteriormente.

Quando as duas equações anteriores atingem o equilíbrio, pode escrever-se a equação básica da porosimetria, a qual permite uma relação directa entre o diâmetro do poro e a pressão à qual o mercúrio está sujeito. Obtem-se assim a equação de Washburn (Eq. 2.18).

$$D = \frac{-4 \cdot \gamma \cdot \cos(\theta)}{P} \quad (2.18)$$

Com base nesta equação, no incremento de pressão, e nos respectivos valores de volume de intrusão, obtem-se uma curva com a distribuição porimétrica da estrutura porosa do material (fig. 2.24).

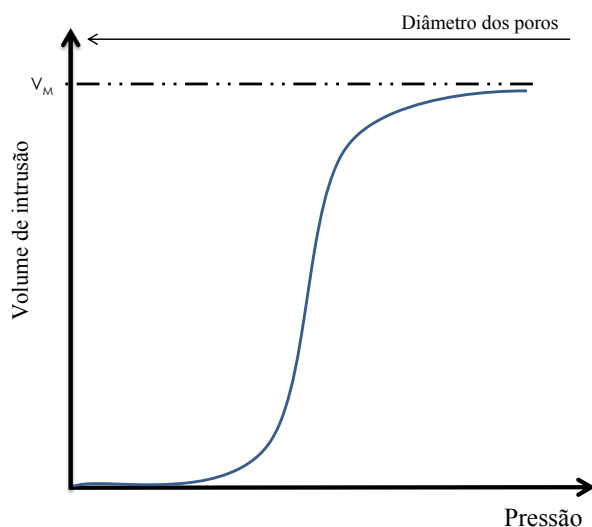


Fig. 2.24: Curva genérica da intrusão de mercúrio no porosímetro.

Em que V_M representa o volume máximo de intrusão, ou seja, o volume da porosidade aberta do material. Apesar de, como referido anteriormente, neste ensaio se assumir a forma cilíndrica de todos os poros, é possível com base na análise das histereses entre a intrusão e extrusão do mercúrio durante o ensaio, identificar o tipo de morfologia dos poros presentes na amostra (fig 2.25).

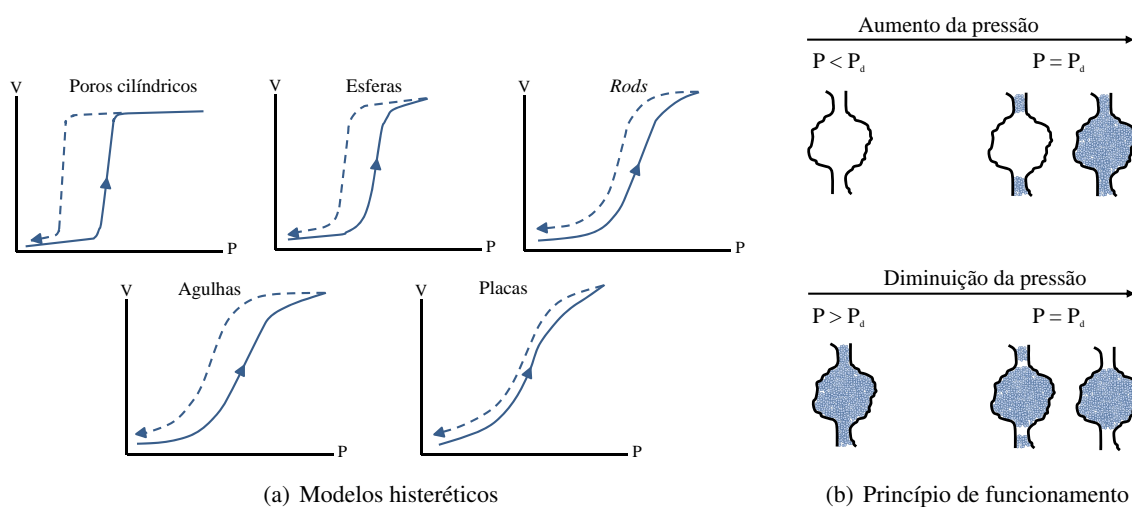


Fig. 2.25: Interpretação dos modelos histeréticos gerados nos ciclos intrusão-extrusão de mercúrio [3].

Capítulo 3

Análise experimental

3.1 Materiais ensaiados

Os materiais de construção analisados nesta dissertação representam uma parte da extensa gama dos materiais que normalmente constituem uma parede de um edifício. A escolha destes materiais recaiu essencialmente nos de maior utilização em edifícios correntes.

Relativamente aos isolantes, foram estudados quatro tipos:

- Placas de poliestirento extrudido - XPS;
- Placas rígidas de poliestireno expandido - EPS;
- Aglomerado de cortiça;
- Lã de origem mineral.

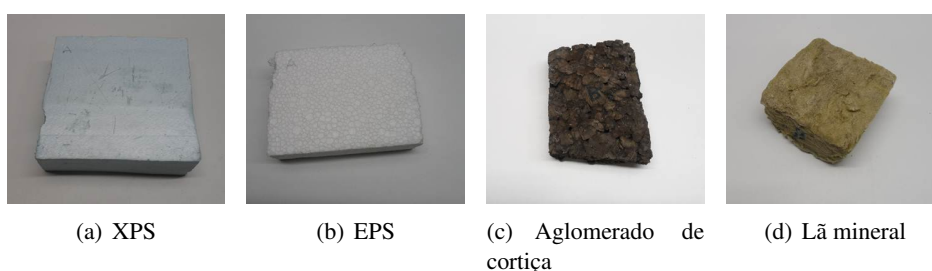


Fig. 3.1: Amostras de materiais utilizados como isolamento

Foram também analisados diferentes composições de argamassas, tanto de cimento como bastardas. Os traços das argamassas estudadas encontram-se descritos na tab. 3.1.

Tab. 3.1: Composição dos varios tipos de argamças analisadas.

	$V_{cimento}$ [cm ³]	V_{cal} [cm ³]	V_{H_2O} [cm ³]	Relação a/L
A1	66,7		40	0,6
A2	66,7		46,7	0,7
A3	66,7		53,3	0,8
A4	50		40	0,8
A5	50		46,7	0,9
A6	50		53,3	1,1
A7	40		40	1
A8	40		46,7	1,2
A9	40		53,3	1,3
A10	33,3	33,3	40	0,6
A11	33,3	33,3	46,7	0,7
A12	33,3	33,3	53,3	0,8
A13	22,2	44,4	40	0,6
A14	22,2	44,4	46,7	0,7
A15	22,2	44,4	53,3	0,8
A16	16,7	50	40	0,6
A17	16,7	50	46,7	0,7
A18	16,7	50	53,3	0,8

Por último, de modo a alargar a gama de materiais estudados, foram analisados outros tipos de materiais utilizados na construção civil, tais como:

- Tijolo cerâmico refractário;
- Tijolo cerâmico furado;
- Pedra de origem calcária (Lioz);
- Betão celular autoclavado;
- Estuque pré-doseado para projecção.

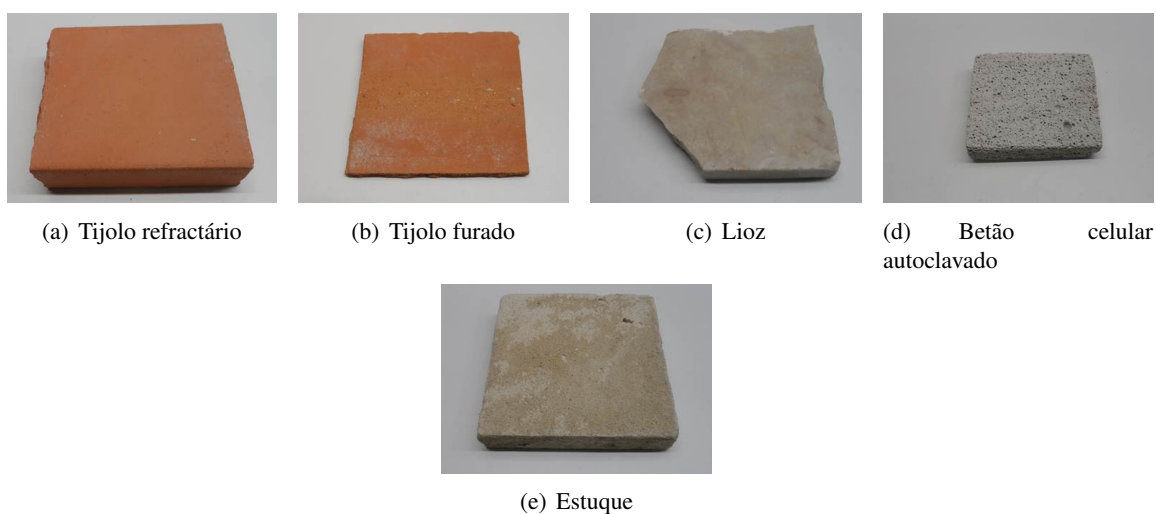


Fig. 3.2: Amostras de materiais comuns utilizados na construção

Para cada material foram testadas três amostras de modo a possibilitar uma análise mais precisa dos resultados obtidos. No caso do estuque e das argamassas, um dos provetes apresenta dimensões $10 \times 10 \times 2$ cm, enquanto que os outros dois têm dimensões iguais $4 \times 4 \times 1$ cm (fig 3.3(a)). Para os restantes materiais os provetes têm dimensões variáveis; no entanto pelo menos uma das amostras apresenta no mínimo dimensões $7 \times 7 \times 2$ cm, sendo que as outras duas amostras são de menor dimensão (fig 3.3(b)). A razão da escolha destas dimensões é explicada na Secção 3.2.3.

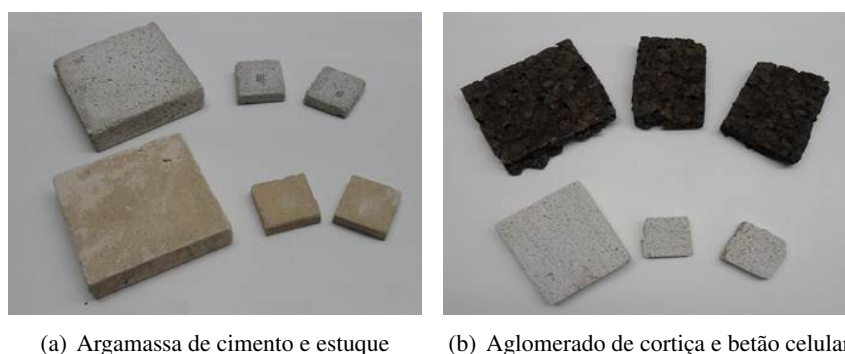


Fig. 3.3: Exemplos representativos das dimensões dos provetes dos materiais analisados

3.2 Caracterização dos materiais analisados

3.2.1 Massa volúmica e porosidade aberta

Os valores da massa volúmica e da porosidade aberta podem ser determinados a partir do mesmo ensaio, elaborado tendo como base os procedimentos descritos nas fichas de ensaio Fe 01 [42] e Fe 02 [41],

os quais estão direccionados para ensaios em pedra natural e artificial. O procedimento destes ensaios baseia-se no princípio da saturação por vácuo, que está ilustrado na fig. 3.4.



Fig. 3.4: Equipamento utilizado na determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta.

Procedimento experimental

O conhecimento da massa volúmica e da porosidade aberta implica a determinação dos valores de três tipos de massas: massa seca (m_0), massa hidrostática (m_1) e massa saturada (m_2).

Inicialmente, os provetes foram colocados numa estufa ventilada a uma temperatura de 60 °C durante um período de tempo de no mínimo 48 horas. Seguidamente, de modo a obter m_0 pesaram-se individualmente todos os provetes numa balança de precisão 0,001 e registaram-se os respectivos valores. Seguidamente colocaram-se os provetes num exsicador, previamente ligado a um reservatório de água e a uma bomba de vácuo. Para reduzir a pressão no interior do exsicador, nas primeiras 24 horas após a introdução dos provetes, o exsicador foi vedado enquanto a bomba de vácuo esteve em funcionamento durante este período.

Terminadas as 24 horas, iniciou-se a introdução de água no exsicador até à total imersão dos provetes. Este processo foi feito lentamente e tendo o cuidado de não deixar cair água directamente sobre os provetes, de modo a evitar o aprisionamento de bolhas de ar no interior das amostras. Os provetes estiveram nestas condições durante 24 horas.

Após este período, retirou-se a tampa do exsicador, ficando os provetes sujeitos à pressão atmosférica durante um período de 24 horas. Findo este intervalo, os provetes foram sujeitos a duas pesagens. A primeira pesagem foi em imersão, obtendo-se assim a massa hidrostática, m_1 , de cada amostra. Após retirar a água em excesso dos provetes com auxílio de um pano humedecido, as amostras foram pesadas uma última vez, chegando-se ao valor da massa saturada, m_2 , de cada provete.

Após a determinação das massas m_0 , m_1 e m_2 , a massa volúmica ($\rho [Kg/m^3]$) pode ser calculada através da eq. 3.1, dada por:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0}{m_2 - m_1} \times 10^3 \quad (3.1)$$

Onde m representa a massa do provete, V o seu volume total, m_0 a massa seca, m_1 a massa hidrostática e m_2 massa saturada do provete.

Por outro lado, a porosidade aberta (P_{ab}) é obtida através da expressão 3.2,

$$P_{ab} = \frac{v}{V} = \frac{m_2 - m_0}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (3.2)$$

onde v representa o volume de vazios do provete e V , m_0 , m_1 e m_2 têm o mesmo significado referido anteriormente.

3.2.2 Adsorção isotérmica

De acordo com a norma EN ISO 12571 [17] existem dois métodos para a determinação da curva de armazenamento de humidade em condições isotérmicas: o método do exsiccador e o método da câmara climática. No primeiro a humidade relativa no interior do exsiccador é controlada através da saturação de soluções salinas adequadas e no segundo é o próprio equipamento que permite o controlo da humidade relativa e da temperatura no seu interior [30]. Nesta dissertação optou-se pelo método da câmara climática seguindo a norma ASTM C 1498-04 [1].

Recentemente foram criados equipamentos que determinam a curva de armazenamento de humidade de uma forma bastante mais rápida. Estes equipamentos baseiam-se numa técnica denominada DVS (*Dynamic Vapor Sorption*), na qual a amostra é sujeita a variações de humidade relativa e temperatura através de controladores de fluxo de massas, um para o ar seco e outro para ar rico em vapor de água. Alguns destes equipamentos disponíveis no mercado são o *VTI-SA* da TA Instruments e *IGAsorp Water Sorption Analyser* da CI Electronics [26].

Nas técnicas anteriormente descritas, a resposta das amostras sujeitas ao ensaio é medida gravimetricamente.

Equipamento utilizado

Na elaboração do ensaio da câmara climática utilizou-se uma estufa e um exsiccador, os quais foram essenciais para a determinação da massa seca das amostras. Posteriormente utilizou-se uma câmara climática *Fitoclima 300* (fig. 3.5), que permitiu a manutenção da humidade relativa no seu interior. Foi ainda utilizada uma balança analítica com precisão de 0,001 g que permitiu conhecer as variações de massa ao longo do ensaio.



Fig. 3.5: Câmara climática Fitoclima 300.

Neste ensaio foram utilizadas três amostras de cada material, uma das quais com dimensões bastante superiores às restantes, de modo a possibilitar o ensaio de determinação da condutibilidade térmica. Note-se que todos os provetes respeitam o valor mínimo de 10 g especificado na norma ASTM C 1498-04 [1].

Para evitar perda de massa por desgaste durante o manuseamento, os provetes de menores dimensões foram colocados no interior de caixas de Petri, como se pode observar na fig. 3.6.

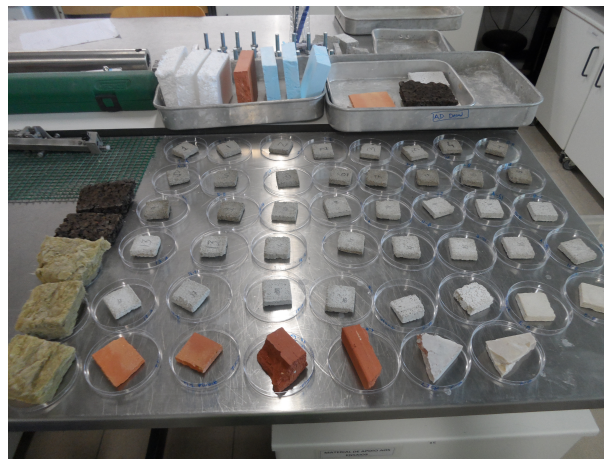


Fig. 3.6: Amostras de cada um dos materiais utilizados no ensaio de determinação da curva de armazenamento de humidade.

Note-se que esta medida teve consequências nos processos de adsorção e desadsorção dos materiais, uma vez que diminuiu a superfície dos provetes de pequenas dimensões em contacto com o ar circundante no interior da câmara climática. Assim, estes provetes foram sujeitos a condições distintas quando

comparados com os de maiores dimensões. Por essa razão optou-se, neste ensaio, por utilizar os resultados fornecidos pelos dois provetes de pequenas dimensões para cada um dos materiais analisados.

Procedimento experimental

A análise experimental baseou-se na norma ASTM C 1498:04 [1]. Numa fase inicial todos os provetes foram colocados na estufa a 75 °C durante 48 horas. Após este período, o conjunto de materiais foi colocado num exsiccador com sílica em gel de modo a permitir o arrefecimento gradual dos provetes sem aumentar o seu teor de água. Passadas 24 horas efectuou-se a primeira pesagem dos materiais. Este processo foi repetido a cada 24 horas, até que no mínimo três medições consecutivas apresentassem um erro inferior a 1%. Alcançado este objectivo, o último dos valores medidos foi considerado como a massa seca do material, m_s .

Adsorção

Determinada m_s , todas as amostras foram colocadas no interior da câmara climática em condições isotérmicas, a uma temperatura de 23 °C, onde foram sujeitas, por ordem crescente, a seis níveis de valores de humidade relativa: 40%, 60%, 70%, 80%, 90% e 95%. Para cada um dos patamares de humidade relativa efectuaram-se pesagens intervaladas de 24 horas até ser atingido o equilíbrio entre o ambiente artificial à humidade relativa definida e as amostras dos materiais. Este equilíbrio foi determinado quando após três pesagens consecutivas intervaladas de 24 horas, a variação do resultado fosse interior a 1%, sendo que, analogamente ao verificado aquando da determinação da massa seca, foi efectuado o registo do último dos três valores, sendo este considerado a massa em equilíbrio, m_h , para o respectivo valor de humidade relativa.

O teor de água em equilíbrio é dado pela eq. 2.8, anteriormente apresentada. Este cálculo foi efectuado para todos os patamares de humidade relativa, possibilitando a construção da curva de adsorção experimental para cada um dos materiais.

Desadsorção

Concluída a fase de adsorção, os provetes foram submersos em água durante um período de 48 horas. Note-se que este processo de submersão foi efectuado muito lentamente de modo a diminuir o aprisionamento de bolhas de ar no interior dos materiais. No fim deste período os provetes foram retirados da água, removida a água em excesso com o auxílio de um pano humedecido e pesados. Definiu-se, assim, o valor máximo da curva de armazenamento de humidade, ou seja, o valor do teor de água para a saturação parcial dos provetes. Seguidamente, utilizando os mesmos patamares de humidade relativa do processo de adsorção mas de forma decrescente, foram registados os valores de teores de água em equilíbrio para cada amostra, tornando possível a construção da curva de desadsorção de cada material estudado.

De modo a diminuir erros experimentais foram tomadas algumas medidas aquando a elaboração do ensaio. Na fase de estabilização dos provetes, o controlo de variação das respectivas massas foi sempre

efectuado nos provetes de maiores dimensões, na medida em que por terem mais massa, são os que levam mais tempo a estabilizar. Este procedimento permitiu a diminuição da variação dos níveis de humidade relativa aos quais os provetes de menores dimensões estiveram sujeitos, uma vez que estas variações tinham como origem apenas a abertura fugaz da porta da câmara climática.

Outro cuidado tomado durante o ensaio foi a posição com que os provetes foram colocados no interior da câmara. Tanto no processo de adsorção como no de desadsorção os materiais foram sempre colocados na mesma posição, pelo que os materiais estiveram sempre sujeitos às mesmas condições higrotérmicas.

3.2.3 Condutibilidade térmica

Os materiais porosos ganham ou perdem massa por adsorção/desadsorção de água até que o equilíbrio termo-higrométrico com o meio envolvente seja atingido. Para determinar a influência da humidade na condutibilidade térmica dos materiais, as amostras foram sujeitas a vários ambientes com diferentes valores de humidade relativa, sendo que para estes patamares foram registados os valores de condutibilidade térmica de cada um.

Equipamento utilizado

O equipamento utilizado para a medição da condutibilidade térmica foi o ISOMET 2104 (*Heat Transfer Analyser*), o qual é constituído por um conjunto de sondas que se adaptam a cada material (fig3.7). Estas sondas podem ser divididas em dois grupos: sondas de agulha para materiais fibrosos e sondas de superfície para materiais mais resistentes. As especificações de cada uma das sondas são apresentadas na fig. 3.8.



Fig. 3.7: ISOMET 2104 e sondas utilizadas no ensaio.

Measurement Ranges:

	Thermal Conductivity	Volume Heat Capacity	Temperature
Needle Probe API 210422	0.015-0.20 W/m.K	$4.0 \times 10^4 - 1.5 \times 10^6$ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	-20°C - +70°C
Needle Probe API 210402	0.035-0.20 W/m.K	$4.0 \times 10^4 - 1.5 \times 10^6$ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	-20°C - +70°C
Needle Probe API 210403	0.20-1.0 W/m.K	$1.5 \times 10^6 - 4.0 \times 10^6$ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	-20°C - +70°C
Needle Probe API 210404	1.0-2.0 W/m.K	$1.5 \times 10^6 - 4.0 \times 10^6$ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	-20°C - +70°C
Surface Probe API 210411	0.04-0.30 W/m.K	$4.0 \times 10^4 - 1.5 \times 10^6$ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	-15°C - +50°C
Surface Probe API 210412	0.30-2.0 W/m.K	$1.5 \times 10^6 - 4.0 \times 10^6$ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	-15°C - +50°C
Surface Probe API 210413	2.0-6.0 W/m.K	$1.5 \times 10^6 - 4.0 \times 10^6$ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	-15°C - +50°C

Accuracy:

	Measurement Range	Accuracy
Thermal Conductivity:	0.015-0.050 W/m.K	5 % of reading + $0.003 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	0.050 – 0.70 W/m.K	5 % of reading + $0.001 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	0.70 - 6.0 W/m.K	10 % of reading
Volume Heat Capacity:	$4.0 \times 10^4 - 4.0 \times 10^6$ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	15 % of reading + $1 \times 10^3 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
Temperature:	-20°C - +70°	1°C

Measurement Reproducibility:

Thermal Conductivity:	Needle Probe API 210422	3 % of reading + $0.003 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Other probes	3 % of reading + $0.001 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Volume Heat Capacity:		3 % of reading + $1 \times 10^3 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$

Fig. 3.8: Especificações técnicas dos acessórios ISOMET 2104 [18].

Da fig. 3.8 conclui-se que a escolha da sonda não depende apenas da consistência dos materiais, mas também da gama de valores de condutibilidade térmica abrangidos para os diferentes valores de humidade relativa. Numa fase inicial e de modo a facilitar a escolha para cada um dos materiais, recorreu-se aos valores tabelados no ITE 50 [36]. Estes valores, bem como as sondas utilizadas e os respectivos erros associados, são apresentados na tab. 3.2.

Tab. 3.2: Valores de λ segundo o ITE50 e respectivas sondas utilizadas nos materiais analisados.

Material	λ - ITE 50 [W/m.K]	Modelo de sonda	Precisão
Pedra Natural	3,5	Surface Probe API 210413	10 % of reading
Tijolo furado	0,77	Surface Probe API 210412	10 % of reading
Tijolo refractário	0,92	Surface Probe API 210412	10 % of reading
Estuque	0,57	Surface Probe API 210411	5 % of reading + 0,001 W/m.K
Argamassas	[1,3;1,8]	Surface Probe API 210412	10 % of reading
Betão celular	[0,16;0,27]	Surface Probe API 210411	5 % of reading + 0,001 W/m.K
XPS	0,037	Needle Probe API 210402	5 % of reading + 0,003 W/m.K
EPS	0,037	Needle Probe API 210402	5 % of reading + 0,003 W/m.K
Aglomerado de Cortiça	0,045	Needle Probe API 210402	5 % of reading + 0,003 W/m.K
Lã de rocha	0,04	Needle Probe API 210402	5 % of reading + 0,003 W/m.K

As medições do ISOMET 2104 baseiam-se na análise da resposta térmica de cada material aos impulsos de fluxo térmico. Este fluxo é induzido por aquecimento eléctrico de uma resistência inserida em cada sonda, que está em permanente contacto com a amostra durante a análise [18].

Segundo o fabricante existem vários factores que influenciam os resultados obtidos durante as medições:

- Qualidade do contacto entre a amostra e a sonda;
- Flutuações da temperatura ambiente;
- Dimensões das amostras;
- Não homogeneidade das amostras;
- Anisotropia do material;
- Humidade de cada amostra.

Note-se ainda que poderão eventualmente surgir, em fase de desadsorção, aumentos de condutibilidade térmica do material com a diminuição do teor de água do mesmo. Esta ocorrência pode ser justificada com base nos fenómenos de migração de água nos poros durante a fase de desadsorção, os quais, como explicado na Secção 2.1.8, são processos complexos e dinâmicos, tal como se ilustra na fig. 3.9.

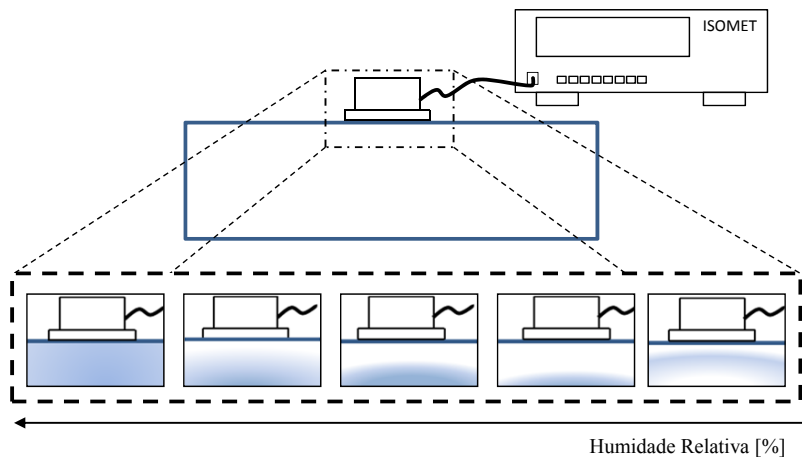


Fig. 3.9: Influência do processo de secagem nas leituras da condutibilidade térmica.

Na fig. 3.9 pode observar-se que numa primeira fase ocorre a secagem das regiões mais próximas da superfície. Na fase seguinte poderá eventualmente ocorrer a retenção de água no interior do material, a qual só será desadsorvida com a diminuição da humidade relativa e consequente diminuição de pressão ambiente. A dada altura, com a diminuição da pressão exterior, a água que anteriormente estava retida no interior do material migrará para a superfície. Este aumento de teor em água na zona superficial do material, local onde a sonda efectua as medições, poderá gerar leituras aparentemente incoerentes.

Características dos provetes

De modo a permitir a obtenção de valores que possam ser extrapolados para a realidade, os provetes com maior consistência, isto é, os provetes nos quais foram utilizadas sondas de superfície (pedra natural, estuque, tijolo cerâmico refractário, betão auto-clavado e provetes de argamassa de diferentes traços) apresentam dimensões de no mínimo 100 mm de lado e 20 mm de espessura. Estas dimensões respeitam os mínimos aconselhados pelo fabricante de 60 mm de lado e 15 mm de espessura, excepto para o provete de tijolo cerâmico furado que apresenta um valor ligeiramente inferior ao mínimo estipulado. Este facto deveu-se a dificuldade na obtenção de uma amostra com as características desejadas. Relativamente à superfície de contacto entre a amostra e a sonda, tentou-se garantir, para todos os materiais, uma superfície o mais regular possível, de modo a diminuir erros de medição causados por este factor. Os materiais em que foram utilizados as sondas de agulha, como os isolantes, apresentam uma dimensão superior a 80 mm de lado bem como uma espessura mínima de 15 mm, respeitando, assim, a norma do fabricante.

Na fig. 3.10 estão ilustradas as amostras de cada um dos materiais usados neste ensaio.

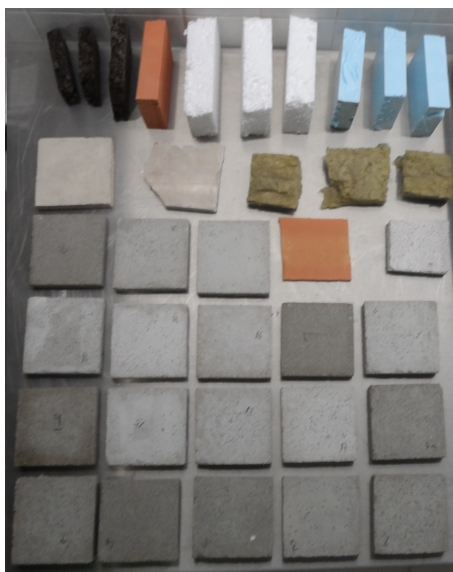


Fig. 3.10: Amostras de cada um dos materiais utilizados no ensaio de determinação da condutibilidade térmica.

Procedimento experimental

Atingido o equilíbrio na câmara climática para o ensaio de determinação das curvas de adsorção e desadsorção, os provetes são colocados sobre uma placa de isolante que tem como função evitar trocas térmicas entre a base e a superfície inferior do provete em análise. Posteriormente é aplicada a sonda indicada para cada um dos provetes.

Tendo em atenção que variações das condições do ambiente (humidade relativa e temperatura) durante o processo experimental influenciam o rigor dos resultados, este ensaio foi realizado num ambiente a 23 °C e com uma humidade de aproximadamente 60%. De notar, que quando se efectuou este ensaio nos provetes que estavam estáveis a humidades relativas diferentes da do ambiente, foram gerados erros. Estes erros foram superiores para valores de humidade relativa inferior à do ambiente, na medida em que a desadsorção é um processo bastante mais moroso que a adsorção [13]. No entanto este erro foi desprezado durante a análise de resultados.

Após esta preparação inicial, escolheu-se a opção *thermal conductivity* no menu de funções do ISOMET 2104 dando-se, assim, início ao ensaio, que demora entre 8 a 17 minutos dependendo do material. Terminado este processo obtiveram-se não só os valores de condutibilidade térmica, λ [$W/m.K$], como também do calor específico por volume, $c\rho$ [$J/m^3.K$] e da difusibilidade térmica, a [m^2/s].

3.2.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A informação sobre as dimensões dos poros de um dado material é obtida através do seu preenchimento forçado com mercúrio, através do aumento de pressão. À medida que a pressão é aumentada, regista-se a quantidade de mercúrio necessária para o preenchimento dos poros. Este registo, juntamente com

a informação sobre o ângulo de contacto do mercúrio na interface sólido-líquido, é utilizado para a determinação da estrutura porosa [12].

Equipamento utilizado

O equipamento utilizado neste ensaio foi o porosímetro *AutoPore IVTM* da Micromeritics (fig 3.11), que se caracteriza pela sua capacidade de efectuar análises em altas e baixas pressões, permitindo assim maior rigor nos resultados.



Fig. 3.11: Autopore IV [22].

O *software* intrínseco do aparelho, permite gerar relatórios em forma de gráficos e/ou tabelas da relação entre o volume intrudido e o diâmetro dos poros [22].

Características dos provetes

De modo a poderem ser analisados, os provetes devem ter dimensões adequadas, permitindo assim a sua colocação no penetrómetro, recipiente de vidro onde ocorrerá o ensaio (fig 3.12). Deste modo, todos os materiais foram preparados por acção mecânica, de forma a serem obtidos provetes com um volume que não excedesse 5 cm³.

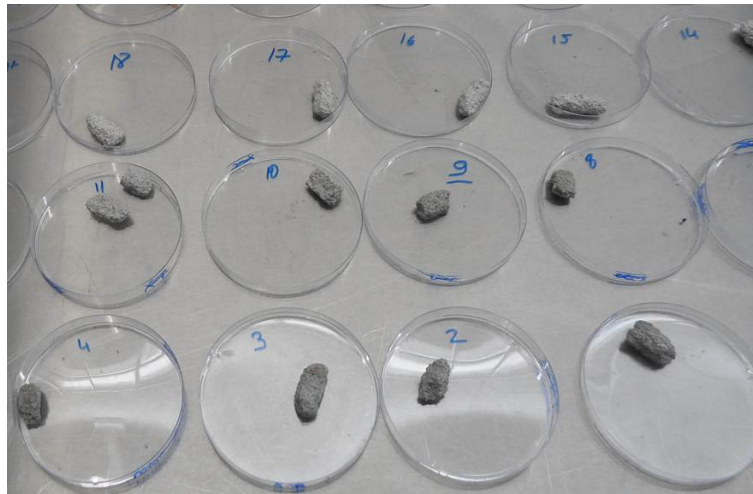


Fig. 3.12: Provetes utilizados no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Procedimento experimental

Terminada a preparação, os provetes foram colocados numa estufa ventilada a 40 °C durante 24 horas. Após esta fase, as amostras foram colocadas num exsiccador, arrefecendo até à temperatura ambiente. Seguidamente as amostras foram pesadas e colocadas no penetrómetro de sólidos. Efectuou-se também a pesagem de todo o conjunto, sendo este posteriormente colocado numa das câmaras de baixa pressão do porosímetro, dando-se início à análise. As massas registadas anteriormente foram depois inseridas no *software* do aparelho de modo a possibilitar o cálculo de volume de mercúrio intrudido em cada material.

Inicialmente o aparelho, aplica uma pressão de 100 μmHg nos materiais, pressão essa que se mantém durante 5 minutos, de modo a ser atingido o equilíbrio (fig 3.13). Após este procedimento foi introduzido mercúrio até ao total preenchimento da envolvente do provete, dando-se início ao processo de intrusão. Este processo traduz-se num incremento de pressão, em 15 patamares pré-definidos, entre os valores de 0,0138 MPa e 0,2068 MPa.



Fig. 3.13: Início do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (adaptada de [21]).

Finalizada a fase de baixa pressão o conjunto foi novamente pesado. De seguida o conjunto foi colocado na câmara de alta pressão, iniciando a análise em alta pressão, a qual compreendeu 67 patamares de pressão entre 0,2758 MPa e 206,8427 MPa. Na fase final do ensaio o aparelho procede à extrusão da pressão instalada utilizando 27 patamares de pressão que variaram entre 206,8427 MPa e 0,1034 MPa [33].

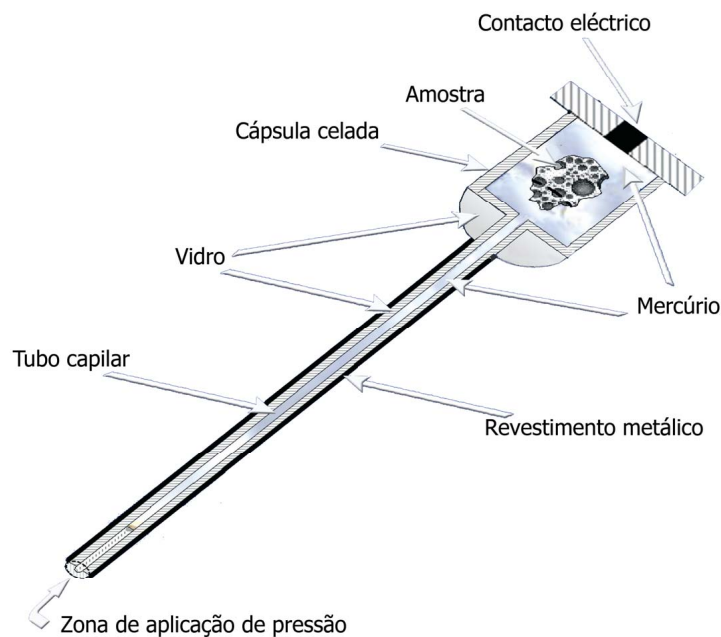


Fig. 3.14: Esquema representativo do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (adaptada de [21]).

Tratamento de dados

Por forma a realizar uma análise mais versátil, optou-se pelo tratamento de dados com base nos *outputs* em forma de tabela fornecidos pelo *software* AutoPore IV 9500. Apresentam-se na tab. 3.3 exemplos desses *outputs*.

Tab. 3.3: Exemplo de dados extraídos do *software* AutoPore™ 9500.

Tabular Report		Cumulative Intrusion vs Pressure				Incremental Intrusion vs Pressure	
Pressure [MPa]	Pore Diameter [μm]	Intrusion for Cycle 1		Extrusion for Cycle 1		Intrusion for Cycle 1	
		Pressure [MPa]	Cumulative Intrusion [mL/g]	Pressure [MPa]	Cumulative Intrusion [mL/g]	Pressure [Mpa]	Incremental Intrusion [mL/g]
0,00366	405,2323	0,003667	1,9447E-31	206,821	0,0970845	0,00366	0
0,01376	107,9433	0,013768	0,01017424	188,088	0,0973644	0,01376	0,0101742
0,02056	72,26628	0,020565	0,01116194	144,825	0,0973644	0,02056	0,0009876
0,02742	54,19038	0,027424	0,0114783	110,354	0,0973644	0,02742	0,0003164
0,0343	43,3024	0,03432	0,0120153	85,531	0,0973644	0,0343	0,00057
0,04117	36,09537	0,041172	0,0128304	66,208	0,0973644	0,04117	0,0008150
0,04807	30,91557	0,048071	0,0130989	50,398	0,0973644	0,04807	0,0002684
0,0549	27,05998	0,05492	0,0133291	39,293	0,0973644	0,0549	0,0002301
0,06179	24,05095	0,061791	0,0134633	29,670	0,0973644	0,06179	0,0001342
0,0686	21,63832	0,06868	0,0135880	22,765	0,0973644	0,0686	0,0001246
0,08585	17,3092	0,085858	0,0143551	17,912	0,0973644	0,08585	0,0007671
0,10327	14,38997	0,103275	0,0150551	13,811	0,0973644	0,10327	0,000700
0,12043	12,33993	0,120433	0,0161579	10,333	0,0973644	0,12043	0,0011027
0,13761	10,79899	0,137617	0,0172127	8,2794	0,0968899	0,13761	0,0010548
0,17215	8,632442	0,172156	0,0185744	6,2303	0,09607	0,17215	0,001361
0,20653	7,195477	0,206537	0,0209813	4,8313	0,0952855	0,20653	0,0024069
0,26187	5,675039	0,261871	0,0248694	3,4760	0,0941908	0,26187	0,0038881
0,32944	4,510947	0,329449	0,0312412	2,7672	0,0933797	0,32944	0,0063717
0,39846	3,729614	0,398467	0,0363469	2,0871	0,0923035	0,39846	0,0051057
0,46896	3,168933	0,468968	0,0402693	1,6712	0,0913378	0,46896	0,0039224
0,54353	2,734183	0,543537	0,0433348	1,3199	0,0900992	0,54353	0,0030655
0,60653	2,450212	0,606531	0,0458230	1,0069	0,0882047	0,60653	0,002488
0,67830	2,190943	0,678306	0,0483347	0,7735	0,0855600	0,67830	0,0025117
0,84782	1,752878	0,847822	0,0539982	0,5966	0,0824931	0,84782	0,0056635
1,02609	1,448337	1,026093	0,0587217	0,4634	0,0792462	1,02609	0,0047235
1,1899	1,248931	1,18992	0,0623834	0,3563	0,0761444	1,18992	0,0036616
1,36586	1,088053	1,365861	0,0654248	0,2185	0,0710315	1,36586	0,0030414
1,54370	0,9627	1,543709	0,0678709	0,1142	0,0670195	1,54370	0,00244
1,7325	0,857775	1,73254	0,0702351			1,73254	0,0023642
1,87933	0,790773	1,879337	0,0718814			1,87933	0,0016463
2,05497	0,723186
2,23420	0,665171						
...	...						

Como referido na Secção 3.2.3, o processo de intrusão de mercúrio processa-se através de 15 mais 67 patamares de pressão, enquanto a extrusão contempla apenas 27.

A relação dada pela equação de Washburn (Eq. 2.18) está representada na coluna *Tabular Report* onde cada nível de pressão, tanto na intrusão como na extrusão, está associado a um determinado diâmetro.

Através da coluna da *Cumulative intrusion vs Pressure* e da relação dada na coluna *Tabular report* é possível obter gráficos do tipo apresentado na fig. 3.15.

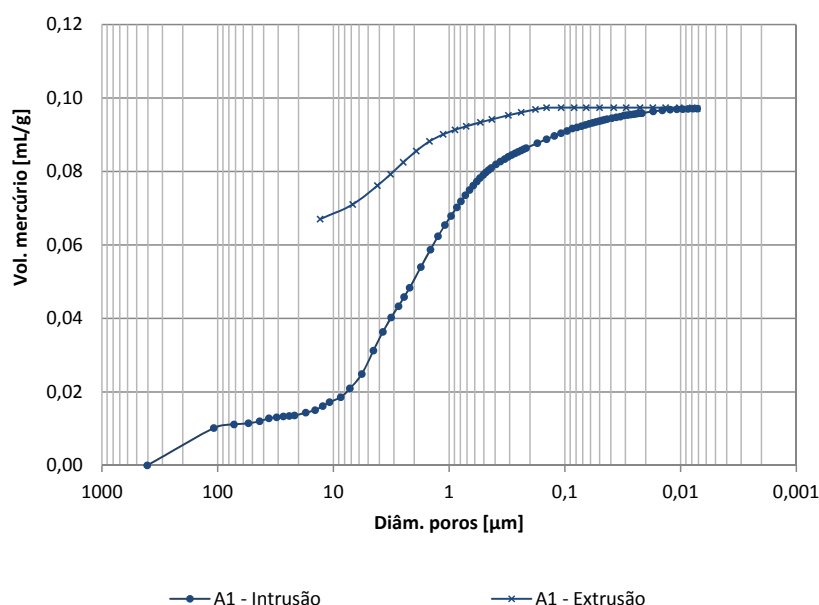


Fig. 3.15: Exemplo de gráfico gerado pela relação volume cumulativo de mercúrio e os respectivos diâmetros.

Na fig. 3.15 está representado um ciclo de intrusão-extrusão de mercúrio, no qual é evidente a histerese do ciclo. De notar que o valor máximo de volume de intrusão, corresponde ao máximo da capacidade de armazenamento do material em análise. A terceira coluna da tab. 3.3 diz respeito ao volume incremental da intrusão de mercúrio na amostra. Através desta coluna é possível gerar gráficos como os representados na fig. 3.16.

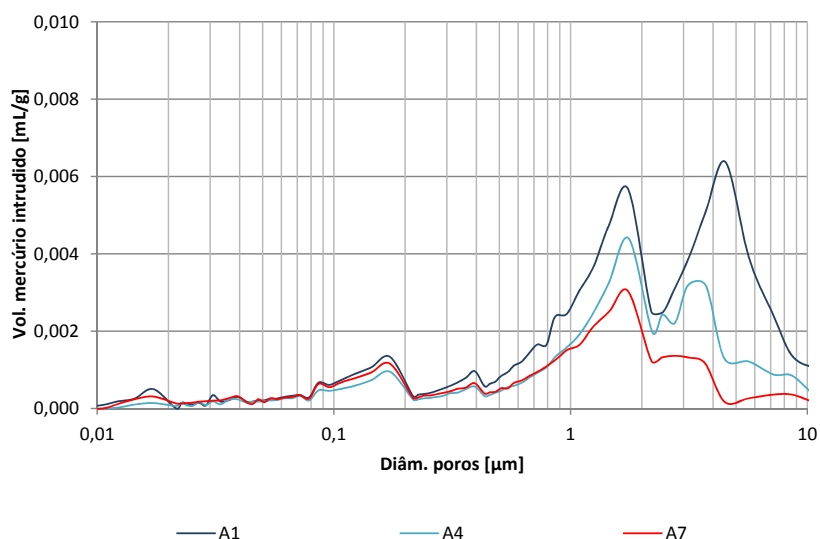


Fig. 3.16: Exemplo do gráfico gerado pelo volume incremental intrudido de mercúrio e os respectivos diâmetros.

Analisando o gráfico anterior, é possível detectar a gama de diâmetros que apresenta maior volume de poros.

Tendo como base os valores cumulativos durante o ciclo de extrusão, foi possível a obtenção dos valores incrementais para cada diâmetro. Porém uma relação directa entre os valores incrementais da intrusão e da extrusão não seria possível uma vez que, como já referido anteriormente, os patamares de análise das duas fases não são necessariamente os mesmos. De modo a contornar este obstáculo foi utilizada uma ferramenta de cálculo, por forma a procurar entre os valores dos diâmetros de intrusão quais os que mais se aproximavam aos valores dos diâmetros de extrusão, juntamente com os respectivos volumes de intrusão incremental. Este artifício permitiu relacionar o volume de mercúrio que foi intrudido com o que saiu, para cada valor de diâmetro, sendo a diferença entre os dois traduzida no volume retido durante o processo para cada diâmetro. É assim possível observar quais as argamassas que apresentam maior presença de poros do tipo tinteiro e para que gama de diâmetros ocorre esse fenómeno. Como seria de esperar esta aproximação gerou alguns erros. No entanto, como se pode verificar na fig. 3.17 a precisão dos resultados é bastante satisfatória.

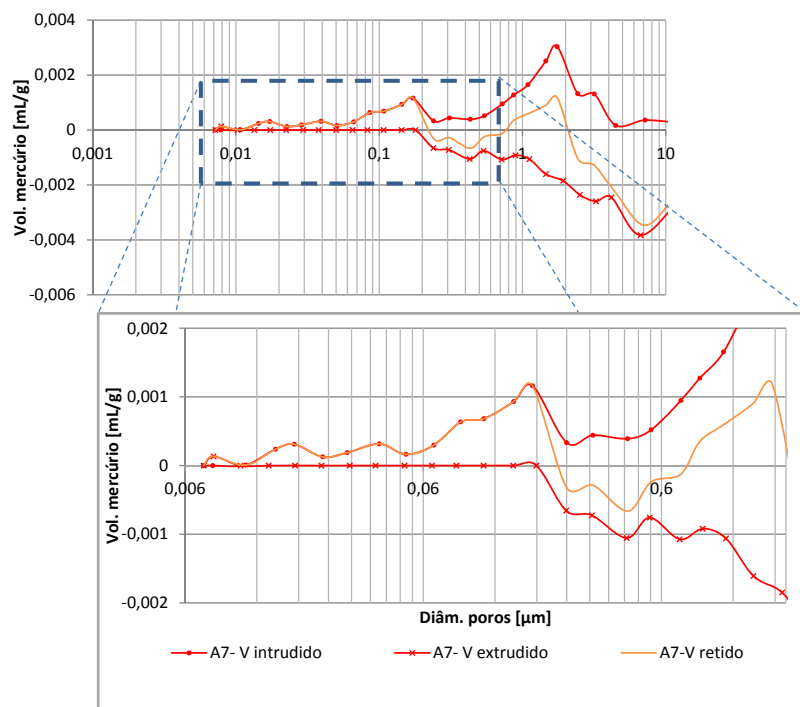


Fig. 3.17: Relação entre os volumes incrementais intrudido e extrudido.

Posteriormente, por forma a efectuar uma análise comparativa entre os materiais, utilizaram-se dois métodos. O primeiro consiste na relação entre o volume retido em cada diâmetro com o volume total de intrusão (fig. 3.18). Esta relação permite determinar, em toda a gama de diâmetros avaliada, quais diâmetros dos poros que apresentam uma maior representatividade em relação ao volume total de intrusão.

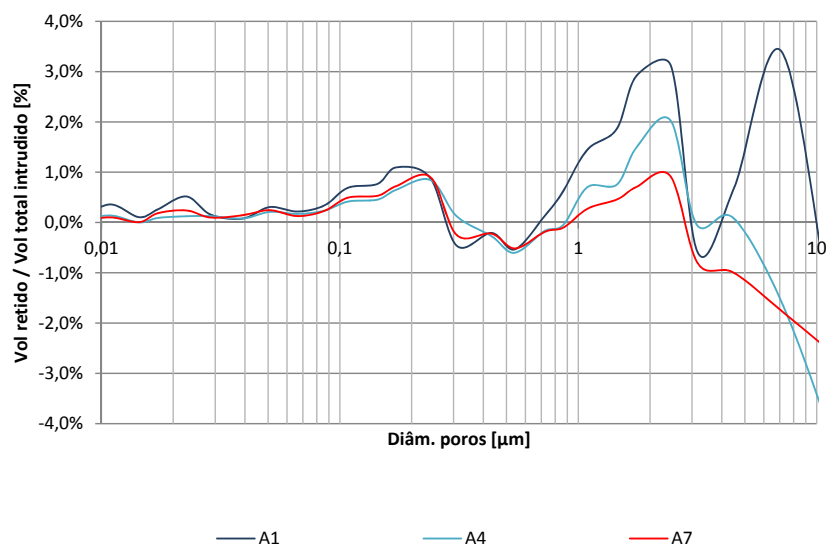


Fig. 3.18: Relação entre o volume incremental retido e o volume total intrudido.

Uma segunda análise incidiu na relação entre o volume retido em cada diâmetro e o volume anteriormente intrudido nesse mesmo diâmetro (fig. 3.19). Esta relação permite observar quais as gamas de poros que apresentam maior retenção durante o processo de extrusão.

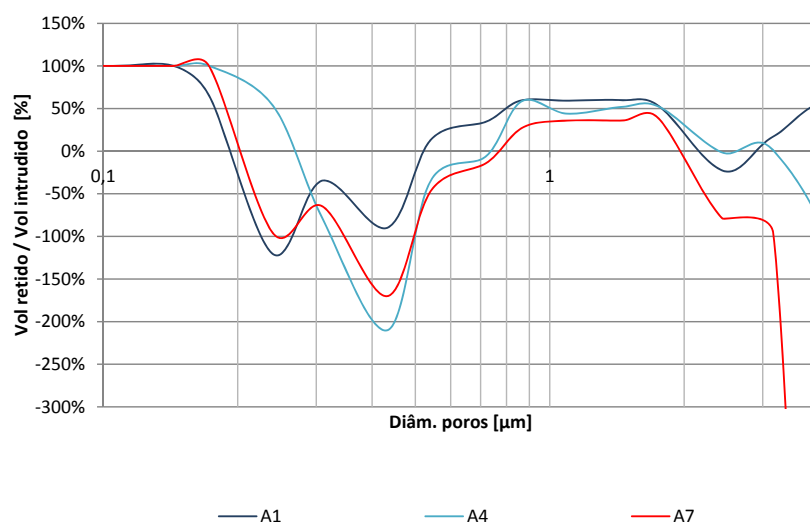


Fig. 3.19: Relação entre o volume incremental retido e o volume incremental intrudido para cada diâmetro.

De salientar o facto de que para algumas gamas de diâmetros observa-se um volume de mercúrio extrudido maior que o intrudido, originando assim volumes retidos negativos. Esta ocorrência pode ser justificada pelo facto de, a dada altura durante a diminuição de pressão, ocorrer a extrusão não só dos diâmetros de poros analisados nessa altura, mas também de todo o volume que ficou retido anteriormente. Ainda assim, apesar destas circunstâncias, é possível efectuar uma análise comparativa entre as argamassas. Como se pode observar na fig. 3.19, mesmo nestas zonas de extrusão excessiva, é

possível constatar diferenças entre as amostras testadas, não só em termos de maior ou menor retenção, como também na ocorrência de poros tipo tinteiro, através da presença de máximos nos gráficos apresentados.

Capítulo 4

Análise de resultados

Com o objectivo de clarificar a análise dos resultados para o conjunto das argamassas analisadas, o conjunto foi dividido em dois grupos:

- Argamassas de cimento;
- Argamassas bastardas.

Tendo como base a tab. 3.1 foram ainda criados subgrupos, de modo analisar a influência de diferentes parâmetros, tais como o volume de cimento das amassaduras (tab. 4.1) e o volume de água utilizado (tab. 4.2).

Tab. 4.1: Reagrupamentos para análise da influência do volume de cimento.

		$V_{cimento}$ [cm ³]	V_{cal} [cm ³]	V_{H_2O} [cm ³]	Relação a/L
Grupo 1	A1	66,7		40	0,6
	A4	50		40	0,8
	A7	40		40	1
Grupo 2	A2	66,7		46,7	0,7
	A5	50		46,7	0,9
	A8	40		46,7	1,2
Grupo 3	A3	66,7		53,3	0,8
	A6	50		53,3	1,1
	A9	40		53,3	1,3
Grupo 4	A10	33,3	33,3	40	0,6
	A13	22,2	44,4	40	0,6
	A16	16,7	50	40	0,6
Grupo 5	A11	33,3	33,3	46,7	0,7
	A14	22,2	44,4	46,7	0,7
	A17	16,7	50	46,7	0,7
Grupo 6	A12	33,3	33,3	53,3	0,8
	A15	22,2	44,4	53,3	0,8
	A18	16,7	50	53,3	0,8

Tab. 4.2: Reagrupamentos para análise da influência do volume de água.

		$V_{cimento}$ [cm ³]	V_{cal} [cm ³]	V_{H_2O} [cm ³]	Relação a/L
Grupo A	A1	66,7		40	0,6
	A2	66,7		46,7	0,7
	A3	66,7		53,3	0,8
Grupo B	A4	50		40	0,8
	A5	50		46,7	0,9
	A6	50		53,3	1,1
Grupo C	A7	40		40	1
	A8	40		46,7	1,2
	A9	40		53,3	1,3
Grupo D	A10	33,3	33,3	40	0,6
	A11	33,3	33,3	46,7	0,7
	A12	33,3	33,3	53,3	0,8
Grupo E	A13	22,2	44,4	40	0,6
	A14	22,2	44,4	46,7	0,7
	A15	22,2	44,4	53,3	0,8
Grupo F	A16	16,7	50	40	0,6
	A17	16,7	50	46,7	0,7
	A18	16,7	50	53,3	0,8

Deve referir-se que parte da análise de resultados do presente capítulo foi publicada na revista Construção Magazine [4] e que o artigo em questão se encontra no Anexo C deste trabalho.

4.1 Massa volúmica, massa específica e porosidade aberta

Na tab. 4.3 são apresentados, para cada um dos materiais, os valores da massa volúmica, ρ , e da porosidade aberta, P_{ab} , obtidos através do ensaio descrito na Secção 3.2.1, bem como resultados relativos à massa específica, M_{esp} , e à porosidade aberta, P_{ab} , fornecidos pela técnica de porosimetria por intrusão de mercurio (MIP).

Tab. 4.3: Resultados experimentais de ρ , massa específica e P_{ab} .

Lista de materiais	Secção 3.2.1		MIP	
	ρ [kg/m ³]	P_{ab} %	M_{esp} [kg/m ³]	P_{ab} %
Pedra Natural	2676,6	1,2	3316,3	0,84
Tijolo refractário	2145,7	17,6	2607,7	20,1
Estuque	1255,0	33,3	2522,2	50,2
Tijolo furado	1977,1	24,6	2648,3	24,5
XPS	$\approx 30^*$	-	-	-
EPS	$\approx 20^*$	-	-	-
Lã mineral	$\approx 40^*$	-	-	-
Aglomerado de cortiça	$> 400^*$	-	-	-
Betão celular	768,1	49,7	2459,2	63,4
A1	2000,0	19,6	2581,6	20,0
A2	2028,9	18,4	2616,5	20,4
A3	2017,9	18,5	2613,6	17,6
A4	1947,2	20,6	2830,1	24,1
A5	2000,1	17,6	2721	19,9
A6	1978,1	18,2	2579,6	20,4
A7	1890,9	24,3	2611,4	25,2
A8	1909,7	22,1	2894,3	27,2
A9	1939,1	19,4	2598,2	19,0
A10	1998,3	17,4	2610,2	21,3
A11	1950,8	19,1	2644,6	22,6
A12	1895,0	20,5	2606,9	26,0
A13	1970,2	17,8	2627,9	22,6
A14	1953,1	18,3	2225,6	22,8
A15	1913,7	20,4	2546,4	24,3
A16	1918,5	19,3	2722,1	23,8
A17	1917,5	20,3	2778,3	26,8
A18	2134,3	14,0	2761,1	26,0

* Valores retirados do ITE50

Devido às características de alguns materiais, não foi possível a sua análise através dos ensaios utilizados. Para estes casos (*) os respectivos valores foram retirados do ITE 50 [36]. Importa referir que o método MIP consiste num procedimento em que a intervenção humana é praticamente inexistente, resultando numa baixa propensão à ocorrência de erros experimentais. Assim, admitem-se como valores mais correctos o obtidos neste ensaio.

A análise dos resultados das argamassas, considerando os grupos mencionados na Secção 4.1, mostra que, tanto para os valores de porosidade aberta, como para a massa volúmica os resultados são inconclusivos. Isto é, não é possível estabelecer uma relação entre as variáveis das medições (quantidades de cimento e água nas argamassas) e as propriedades medidas. Constatou-se esta inconsistência tanto para as argamassas de cimento como para as bastardas.

4.2 Adsorção/desadsorção e λ

4.2.1 XPS e EPS

Na fig. 4.1 apresentam-se as curvas higroscópicas do XPS e do EPS, materiais usualmente utilizados como isolantes térmicos.

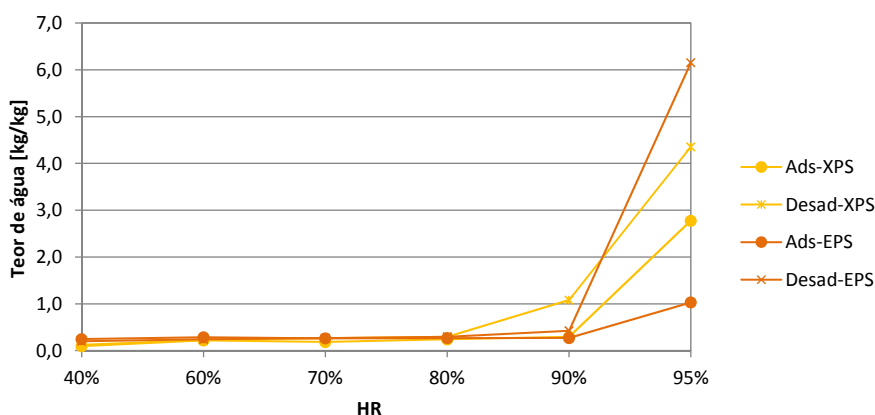


Fig. 4.1: Curvas higroscópicas correspondentes ao XPS e ao EPS.

Numa primeira análise, constata-se uma elevada semelhança entre as curvas dos dois materiais para a generalidade dos patamares de humidade relativa.

As curvas de adsorção de ambos os materiais, são bastante idênticas, apresentando pouca variação entre os 40 e os 90% de humidade relativa. A partir deste patamar, observa-se que o XPS apresenta um maior declive em comparação com o do EPS e consequentemente um maior teor de água em equilíbrio para os 95%.

Note-se que analisando as curvas de adsorção de ambos os materiais, é possível constatar que para os 95% de humidade relativa, o XPS apresenta um valor superior de teor de água em equilíbrio quando comparado com o EPS. Analisando, para o mesmo patamar de HR, porém em fase de desadsorção, constata-se que a curva higroscópica do EPS situa-se superiormente à do XPS.

Ainda em fase de desadsorção é possível observar que entre os 95% e os 90%, a curva correspondente ao EPS apresenta maior declive que a do XPS, este facto tem como consequência um valor de teor de água inferior para os 90% por parte do EPS.

Deve referir-se ainda que em fase de desadsorção o teor de água em equilíbrio, entre os 90 e os 40% de humidade relativa, pouco varia para o caso do EPS. Analisado o XPS, observa-se que esta estabilização ocorre a partir dos 80%.

Condutibilidade térmica

Na fig. 4.2 observa-se a evolução da condutibilidade térmica de ambos os materiais ao longo das fases de adsorção e desadsorção. Os gráficos revelam a baixa variação da condutibilidade térmica ao longo do ensaio.

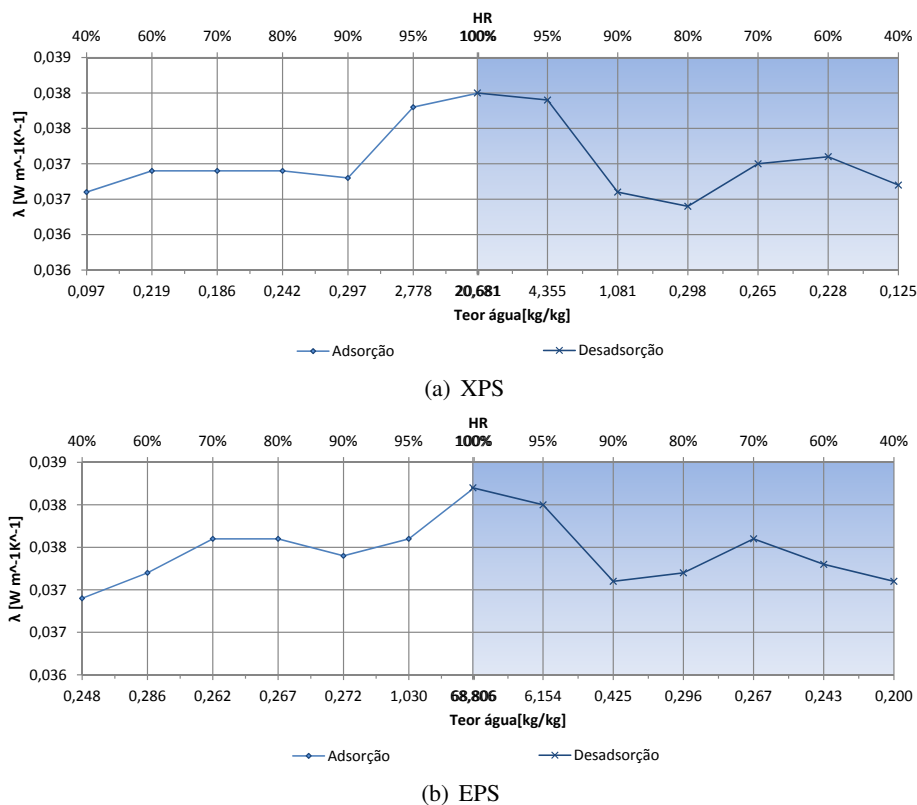


Fig. 4.2: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - XPS e EPS.

A utilização, para este tipo de materiais, de sondas de agulha que realizam medições no interior dos materiais, diminui as oscilações nas leituras devidas às alterações das condições ambiente. Idealmente, tanto na fase de adsorção como na fase de desadsorção, os gráficos deveriam ter comportamentos monótonos, ou seja, não deveriam apresentar picos. Estas variações devem-se ao facto desta análise ser so tipo discreta, pelo que são expectáveis pequenas oscilações nos resultados obtidos.

4.2.2 Aglomerado de cortiça e lã-mineral

Na fig. 4.3 estão representadas as curvas higroscópicas do aglomerado de cortiça e da lã-mineral. Importa referir que para o caso da lã-mineral apenas se apresentam resultados para a fase de adsorção. Isto deveu-se a um erro experimental que levou à impossibilidade de analisar este material na fase de desadsorção.

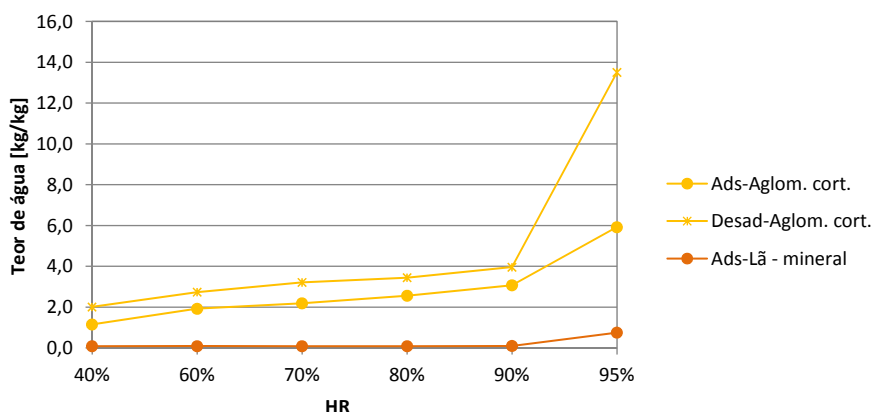


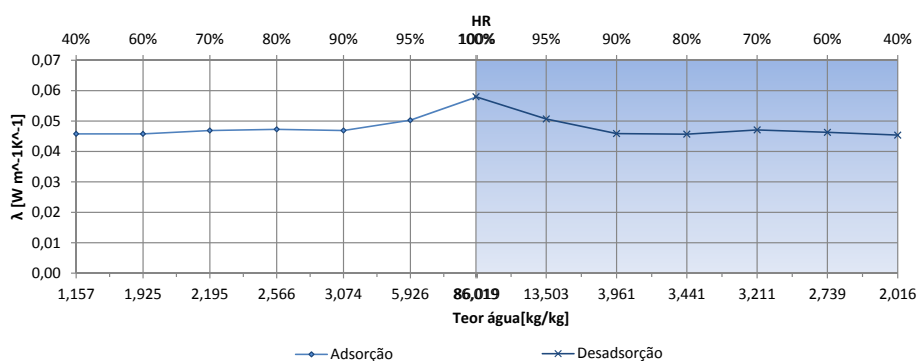
Fig. 4.3: Curvas higroscópicas correspondentes ao aglomerado de cortiça e à lã-mineral.

Da fig. 4.3 conclui-se que o aglomerado de cortiça adsorve substancialmente mais vapor de água que a lã mineral. Em ambos os materiais denota-se um aumento do declive após os 90% de umidade relativa, sendo este aumento, quando comparado com os patamares anteriores, mais evidente para o caso do aglomerado de cortiça.

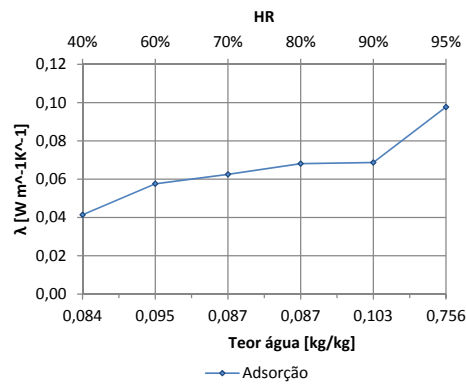
Relativamente à fase de desadsorção, constata-se a presença de um efeito histerético ao longo de todas as gamas de umidade relativa testadas. Este efeito apresenta sensivelmente as mesmas características até aos 90%, isto é, a curva de desadsorção desenvolve-se paralelamente à adsorção.

Condutibilidade térmica

Na fig. 4.4 são apresentadas as variações de condutibilidade térmica com a variação do teor de água dos materiais.



(a) Aglomerado de cortiça



(b) Lã-mineral

Fig. 4.4: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - Aglomerado de cortiça e lã mineral.

Analisando a fig. 4.4(a) constata-se que apesar do efeito histerético presente nas fases de adsorção e desadsorção, em termos de condutibilidade térmica aparentemente não existem diferenças significativas entre as duas fases. Relativamente à lã mineral (fig. 4.4(b)), uma análise comparativa entre este material e o aglomerado de cortiça permite constatar que, apesar dos valores de teores de água em equilíbrio superiores por parte do aglomerado de cortiça (fig. 4.3), a lã mineral apresenta, de uma forma geral, maiores valores de condutibilidade térmica durante a fase de adsorção. Como explicado na Secção 2.3, o facto da lã mineral apresentar valores de porosidade fechada muito próximos de zero, reflecte-se em valores de condutibilidade térmica superiores quando comparados com o aglomerado de cortiça.

4.2.3 Pedra natural

Na fig. 4.5 ilustra-se o desenvolvimento das curvas higroscópicas para a pedra natural de origem calcária (lioz).

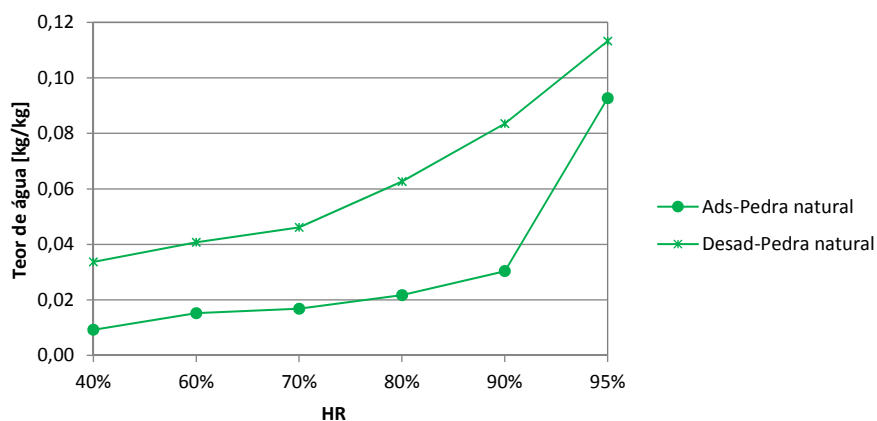


Fig. 4.5: Curvas higroscópicas correspondentes à pedra natural.

Como se pode observar, a curva de adsorção deste material apresenta um ligeiro declive entre os 40 e os 90% de humidade relativa, seguido de um aumento brusco deste valor.

Comparativamente com os restantes materiais, da análise dos teores de água em equilíbrio das fases de adsorção e desadsorção ilustradas na fig. 4.5, é possível constatar que o efeito histerético para este material, é praticamente inexistente. Pode, no entanto, observar-se o facto da desadsorção apresentar um declive ligeiramente inferior em relação à curva de adsorção. Não foi possível analisar a estrutura porosa deste material, em consequência das sucessivas incoerências nos resultados.

Condutibilidade térmica

Apesar do efeito histerético negligenciável entre as curvas higroscópicas, da análise da condutibilidade térmica (fig. 4.6) percebe-se que para os mesmos valores de humidade relativa, as fases de adsorção e desadsorção apresentam diferenças consideráveis, com diferenças superiores a 10 %. Analisando a fig. 4.6 percebe-se que, para os mesmos valores de humidade relativa, a condutibilidade térmica apresenta diferenças consideráveis entre a fase de adsorção e desadsorção, apresentando, na ultima, valores superiores até 10 % em relação à primeira.

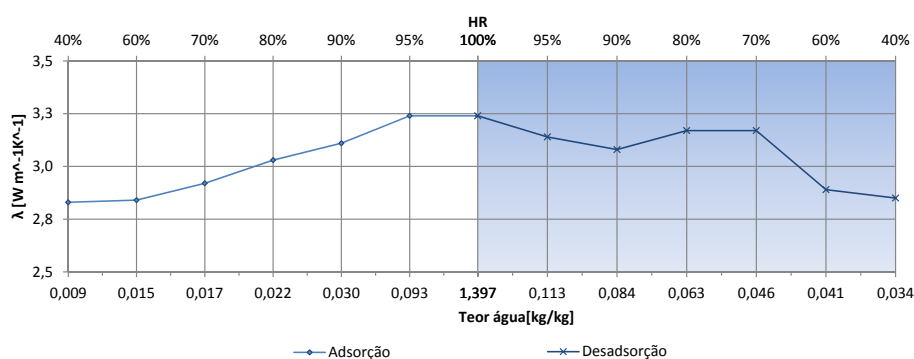


Fig. 4.6: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - pedra calcária.

4.2.4 Material cerâmico

O grupo dos materiais cerâmicos é constituído pelos dois tipos de tijolos cerâmicos:

- Tijolo furado;
- Tijolo refractário.

As respectivas curvas higroscópicas estão ilustradas na fig. 4.7.

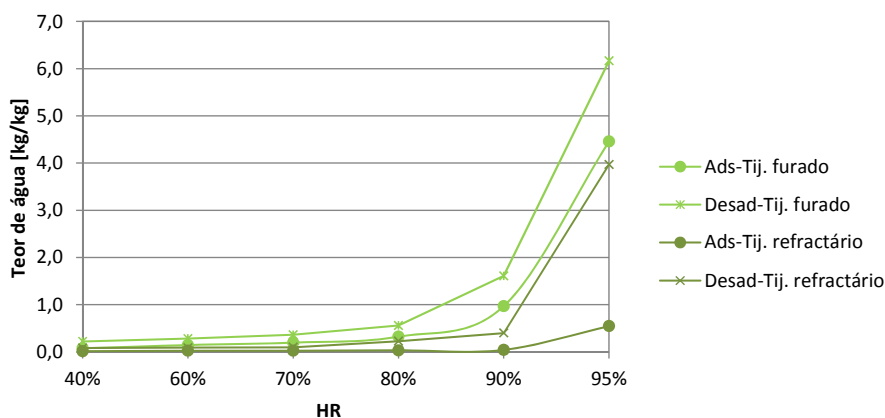


Fig. 4.7: Curvas higroscópicas correspondentes ao tijolo furado e ao tijolo refractário.

Após análise da fig. 4.7 verifica-se que ambas as curvas higroscópicas do tijolo furado se encontram acima da curva de desadsorção do tijolo refractário. Conclui-se assim que o último adsorve menos vapor de água que o primeiro. Esta facto pode ser justificado através da análise da estrutura porosa dos materiais. Na fig. 4.8 apresentam-se as distribuições dos diâmetros dos poros para cada um dos materiais.

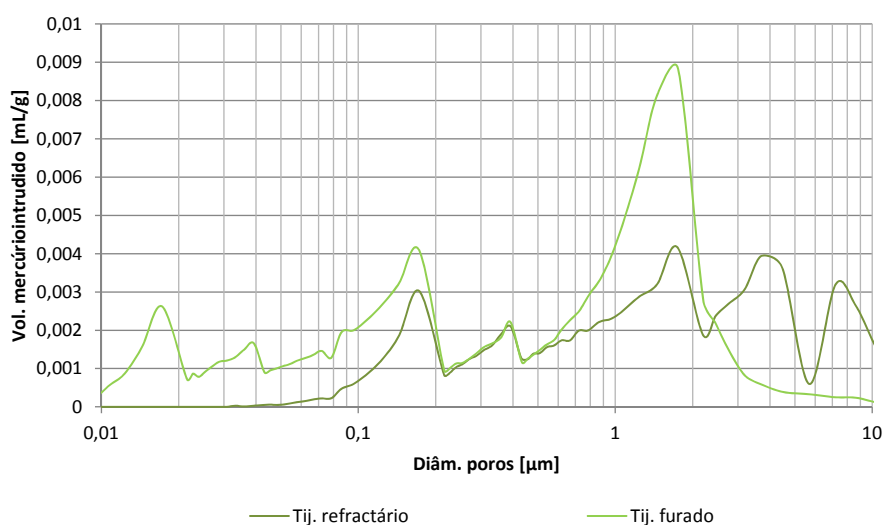
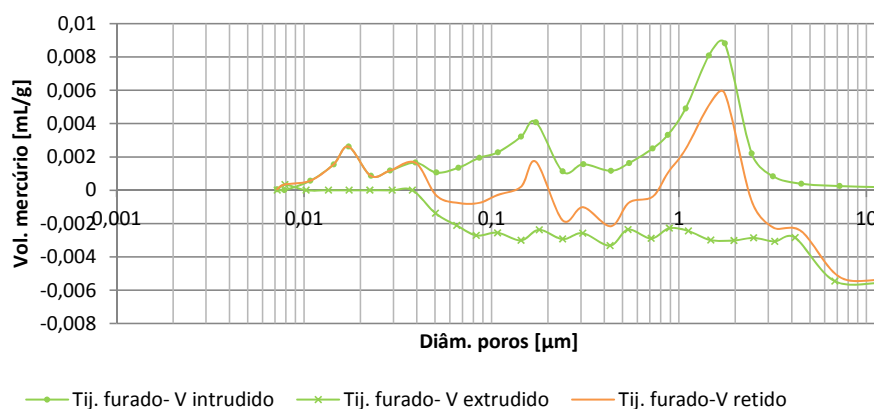


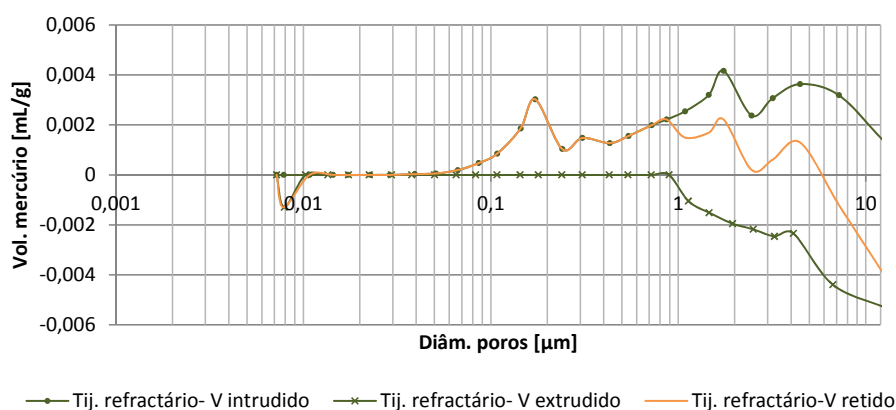
Fig. 4.8: Distribuição de diâmetros de poros para uma amostra de tijolo furado e uma de tijolo refractário.

Na tab. 4.3 pode ver-se que a porosidade aberta do tijolo refractário é inferior à do tijolo furado. Estes valores reflectem uma menor capacidade de armazenamento de humidade por parte do tijolo refractário.

São seguidamente apresentadas, na fig. 4.9, as relações entre o volume incremental intrudido e extrudido para estas duas amostras.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para uma amostra de tijolo furado.



(b) Relação entre os volume incremental intrudido e extrudido para uma amostra de tijolo refractário.

Fig. 4.9: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para os materiais cerâmicos analisados.

Analisando os gráficos da fig. 4.9 obtém-se a relação entre os volumes retido e intrudido em cada diâmetro (fig. 4.10) e a relação entre os volumes retido em cada diâmetro e o total intrudido na amostra (fig. 4.11).

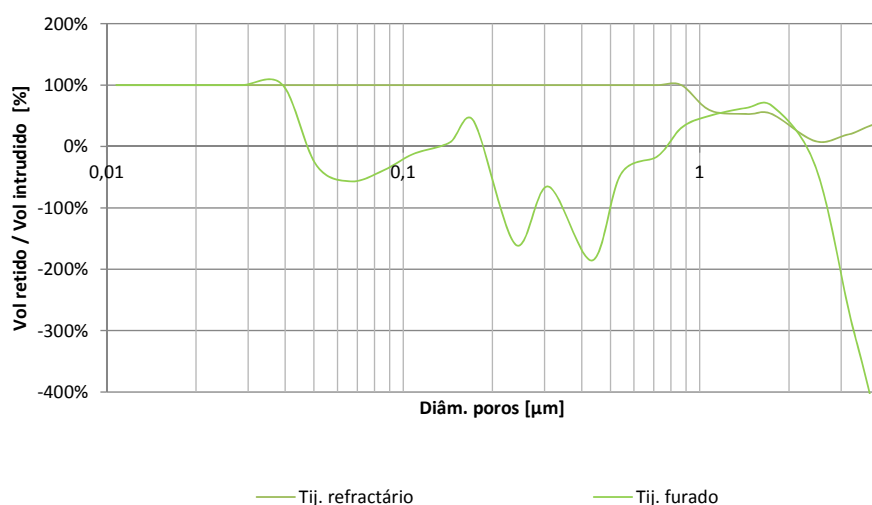


Fig. 4.10: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para uma amostra de tijolo furado e uma de tijolo refractário.

Numa primeira abordagem das figuras 4.9 e 4.10, observa-se que o tijolo refractário apresenta uma retenção superior à do tijolo furado. Tendo esta informação, ao analisar a fig. 4.11 pode-se concluir que a representatividade dos poros inferiores a $0,1 \mu\text{m}$, para o tijolo refractário, é praticamente nula devido à inexistência de poros nesta gama de diâmetros (fig. 4.8).

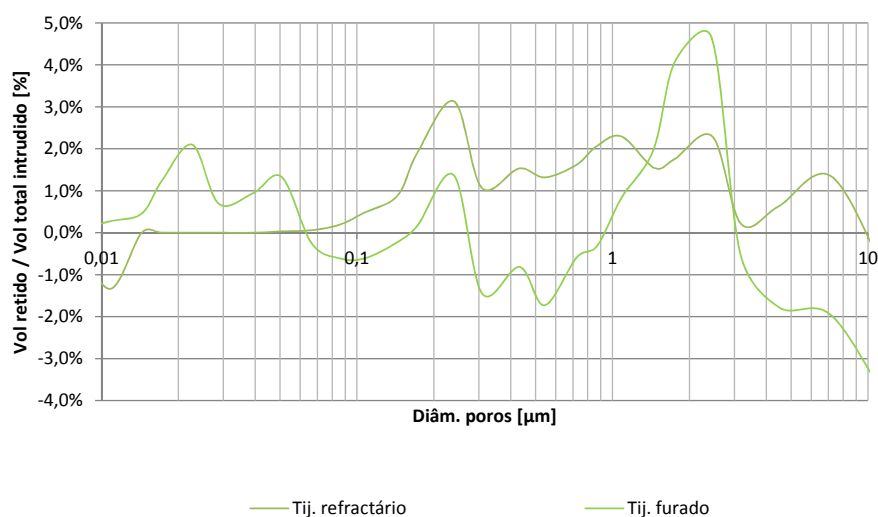


Fig. 4.11: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para uma amostra de tijolo furado e uma de tijolo refractário.

Na fig. 4.11 observa-se ainda que entre $0,06$ e $1,4 \mu\text{m}$ a curva do tijolo refractário encontra-se acima da curva do tijolo furado. No entanto, esta informação provavelmente não corresponde à realidade, uma vez que deve ser tido em conta a inexistência de poros até $0,01 \mu\text{m}$ por parte do tijolo refractário. Assim,

para os diâmetros seguintes é expectável que não ocorram extrusões excessivas de mercúrio, facto que ocorre para o tijolo furado. Deste modo, a diferença nesta gama de poros, se existir, é bastante inferior á ilustrada na fig. 4.11, pelo que, de um modo geral, o tijolo furado apresenta maior retenção que o tijolo refractário, justificando assim as posições das curvas higroscópicas da fig. 4.7.

Condutibilidade térmica

Na fig. 4.12 estão representadas as curvas que relacionam a condutibilidade térmica com o teor de água dos materiais cerâmicos estudados.

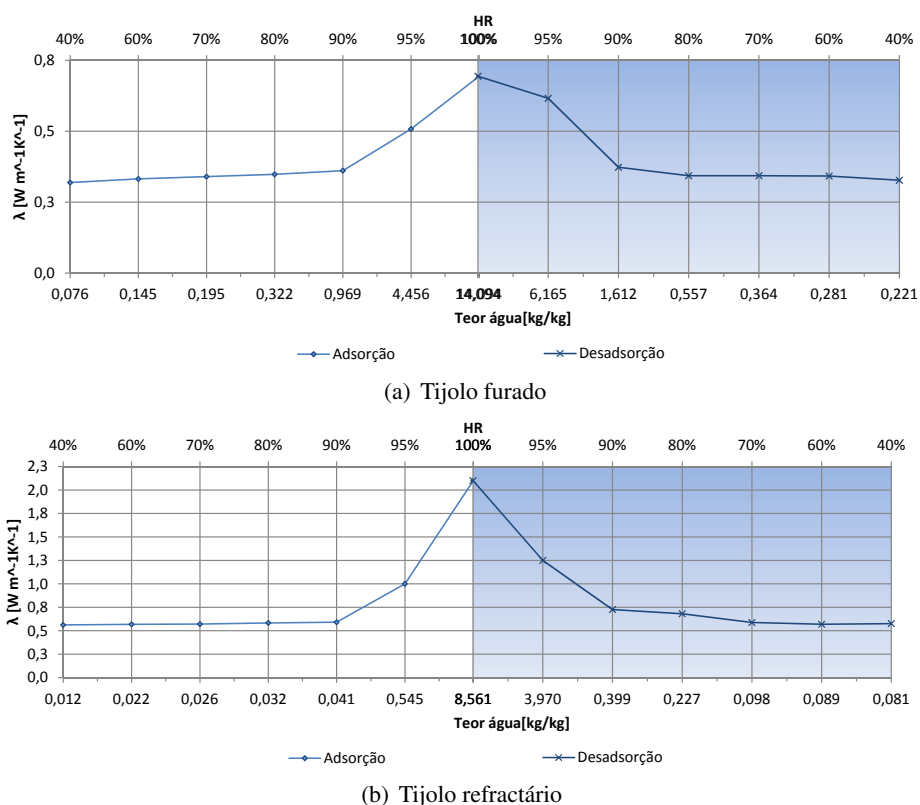


Fig. 4.12: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - materiais cerâmicos.

Com base na análise das curvas de adsorção (fig. 4.7) seria expectável que os resultados obtidos durante o ensaio de condutibilidade térmica indicassem valores superiores para o tijolo furado. No entanto, como se pode constatar na fig. 4.12, tal não ocorre, apresentando o tijolo refractário maiores valores de condutibilidade térmica. Esta ocorrência pode ter como origem o facto mencionado na Secção 3.2.3, que refere o incumprimento da espessura mínima por parte do provete de tijolo cerâmico furado.

4.2.5 Estuque

Ilustra-se na fig. 4.13 o comportamento em fase de adsorção de uma amostra de estuque. Deve referir-se que a razão pela qual não foi possível apresentar a curva de desadsorção deste material teve como origem

um erro experimental que originou uma perda brusca de massa do amostra, inviabilizando assim todos os resultados subsequentes.

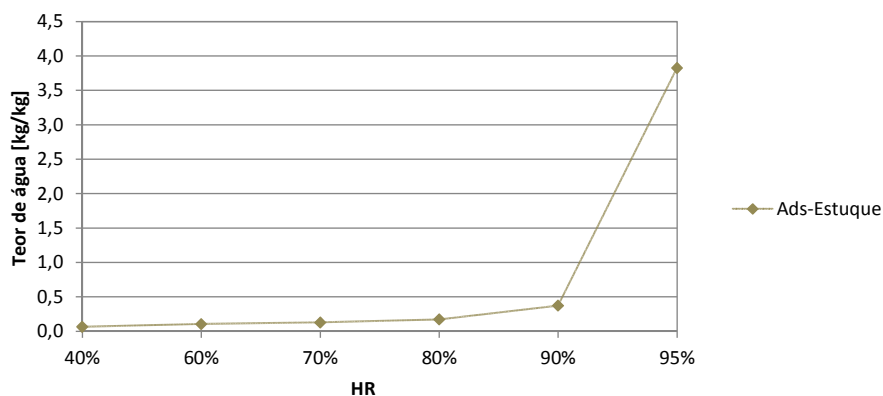


Fig. 4.13: Curva higroscópica correspondente a uma amostra de estuque.

Analisando a fig. 4.13 verifica-se que a curva correspondente à adsorção do material apresenta um ligeiro aumento de declive com o aumento dos valores de umidade relativa até aos 90%, valor a partir do qual se constata um aumento brusco do valor de teor de água da amostra.

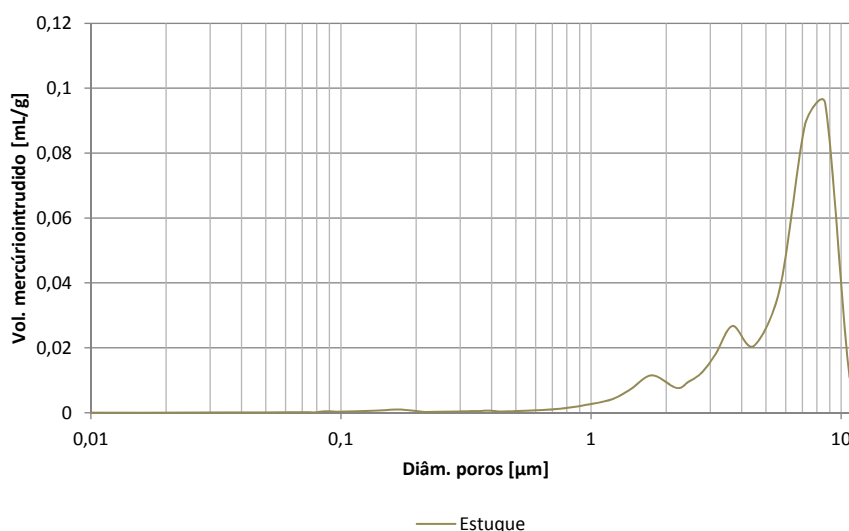


Fig. 4.14: Distribuição de diâmetros de poros para uma amostra de estuque.

A fig. 4.14, apresenta a distribuição de poros do estuque, observando-se que o maior volume de poros está presente entre os 1 e 10 μm .

Apresenta-se na fig. 4.15 a análise entre o volume intrudido e extrudido, onde se pode verificar que para a gama de poros analisada, um elevado volume de mercúrio retido até aos 7 μm evidenciando assim a existência de poros tipo tinteiro até este diâmetro.

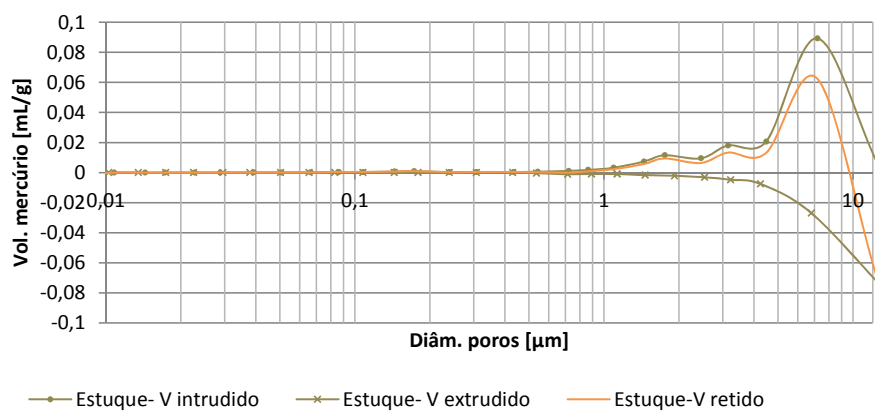


Fig. 4.15: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para uma amostra de estuque.

Nas figuras 4.16 e 4.17 estão ilustrados, respectivamente, a relação entre os volumes retido e intrudido e a relação entre os volumes retido em cada diâmetro e o total intrudido na amostra.

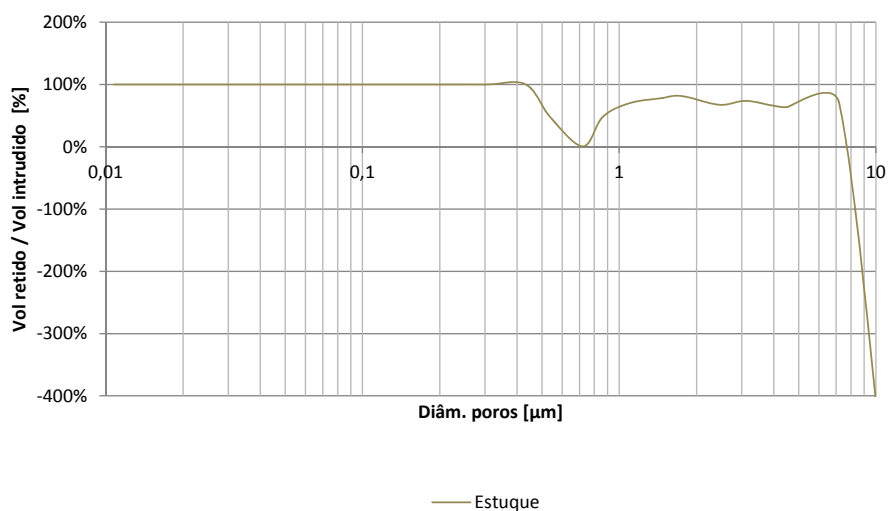


Fig. 4.16: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para uma amostra de estuque.

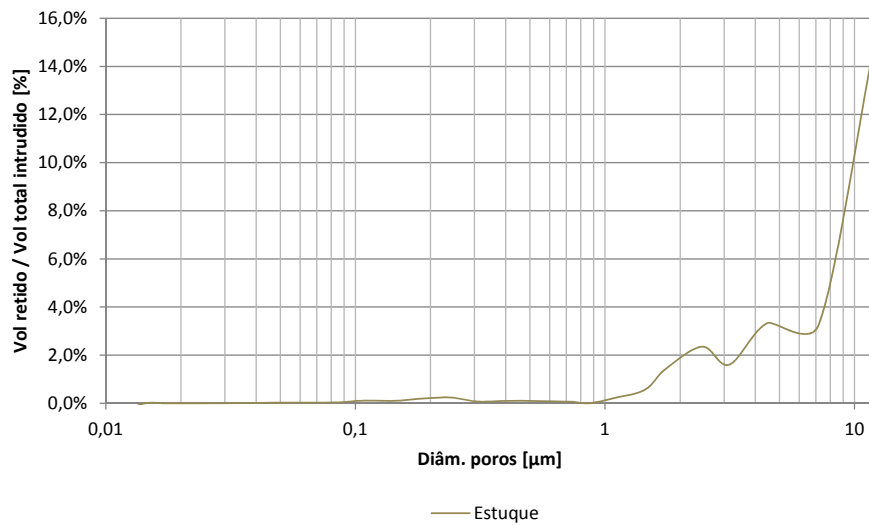


Fig. 4.17: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para o estuque.

Como se constata na da fig. 4.16 o estuque apresenta valores de retenção elevados observando-se a extrusão do volume anteriormente retido perto dos 10 μm . Deve ainda referir-se que é também este diâmetro de poros que apresenta maior representatividade na porometria da amostra (fig. 4.17).

Condutibilidade térmica

Na fig. 4.18 está registado o comportamento, em termos de condutibilidade térmica, de uma amostra de estuque. Como seria espectável, a análise da condutibilidade térmica do estuque apresenta uma clara relação com a curva de adsorção do material ilustrada na fig. 4.13.

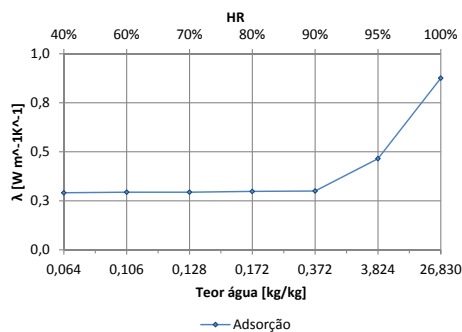


Fig. 4.18: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - estuque.

4.2.6 Betão celular autoclavado

Na fig. 4.19 apresentam-se as curvas de adsorção e desadsorção do betão celular autoclavado e, como se pode observar, os valores de teor de água em equilíbrio são bastante superiores em relação aos

restantes materiais. Este facto pode ser justificado com base nos valores da tab. 4.3, na qual se constata que o betão celular autoclavado é o material com maior porosidade aberta entre todos os analisados. Consequentemente verifica-se uma maior maior capacidade de armazenamento de humidade por parte do material, apresentando, deste modo, valores superiores de teor de água em equilíbrio. É de notar, ainda, o facto do efeito histerético deste material estar mais evidenciado para humidade relativa entre 70 e 95%.

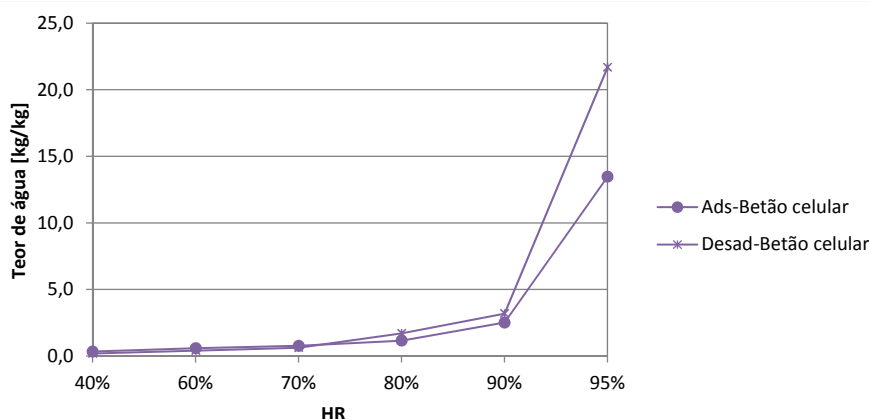


Fig. 4.19: Curvas higroscópicas correspondentes ao betão celular autoclavado.

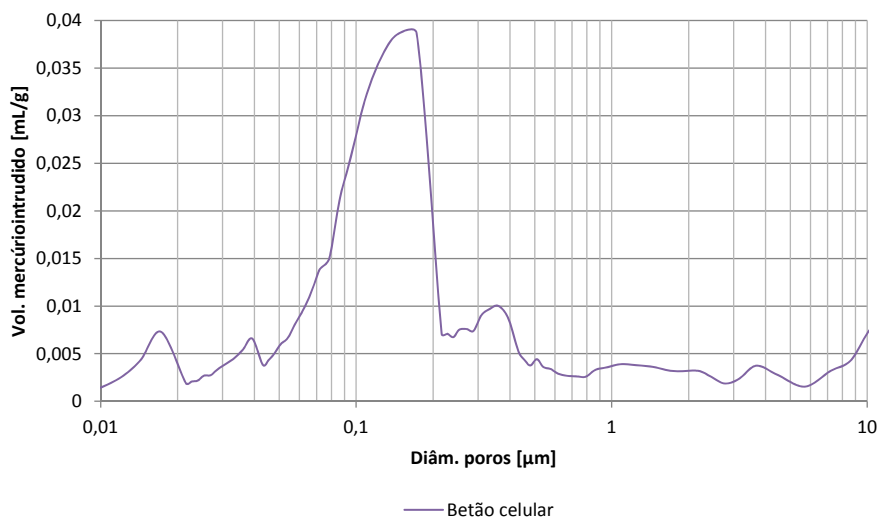


Fig. 4.20: Distribuição de diâmetros de poros para uma amostra de betão celular.

Na fig. 4.20 observa-se que o betão celular apresenta um volume de mercúrio intrudido, para a gama entre 0,1 e 0,2 μm , muito superior aos restantes materiais. Da análise da fig. 4.21 constata-se que é exactamente nesta gama que ocorre o maior volume de retenção, indicando assim a presença de poros tinteiro para estes diâmetros. Com a diminuição de pressão observa-se que a curva de volume retido

aproxima-se da de volume extrudido, sugerindo que a retenção para diâmetros superiores a $0,2 \mu\text{m}$ é praticamente nula.

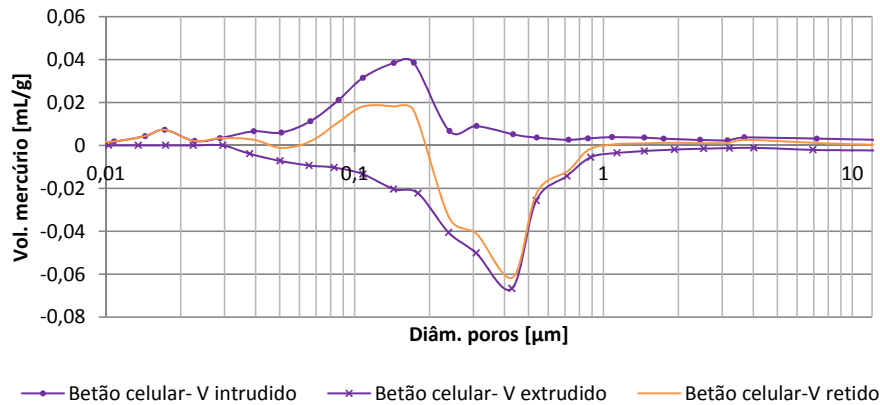


Fig. 4.21: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para uma amostra betão celular autoclavado.

Analisa-se na fig. 4.22, a relação entre o volume retido em cada diâmetro e o volume total intrudido para o betão celular, em comparação, a título de exemplo, com o tijolo furado. Comparando os dois materiais conclui-se que apesar de em termos percentuais o tijolo furado apresentar, de um modo geral, uma maior retenção, o volume superior de poros por parte do betão celular prevalece sobre a percentagem de volume retido.

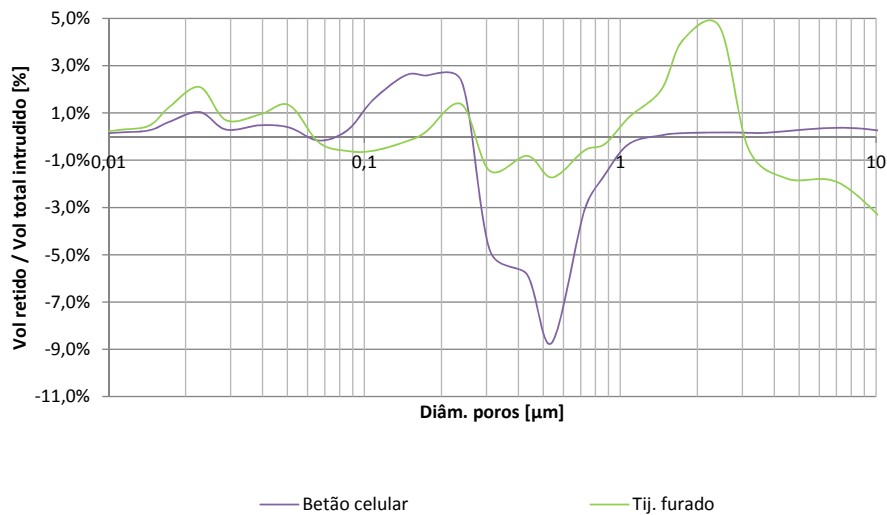


Fig. 4.22: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para uma amostra betão celular.

Condutibilidade térmica

A fig. 4.23 ilustra a evolução da condutibilidade térmica do material com a variação do teor em água.

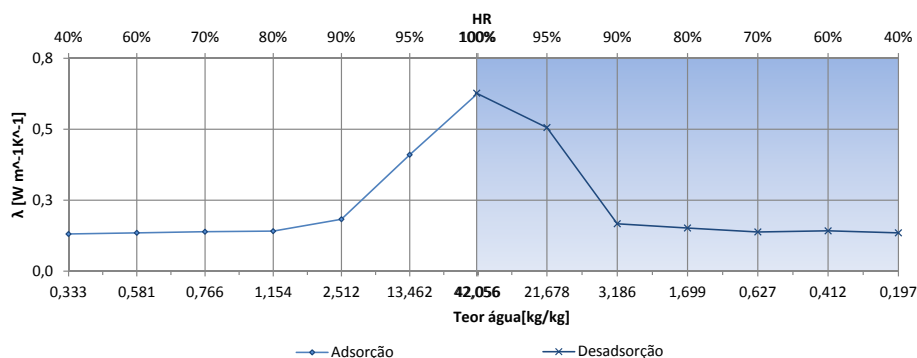


Fig. 4.23: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água - betão celular autoclavado.

Estabelecendo, novamente, uma comparação com o tijolo furado (fig 4.12(a)), observa-se que, apesar dos maiores valores de teor de água em equilíbrio, para toda a gama de valores de humidade relativa o betão celular apresenta valores inferiores de condutibilidade térmica. Provavelmente, esta situação deve-se ao facto do betão celular ser um material extremamente poroso e por este apresentar uma porometria bastante superior à dos restantes materiais analisados. O maior diâmetro de poros propiciará uma secagem mais rápida do material. Tendo ainda em conta que a determinação da condutibilidade térmica é um processo que demora aproximadamente 13 minutos, este período poderá ser suficiente para que o teor de água à superfície do material diminua consideravelmente, diminuindo assim a condutibilidade térmica registada pelo aparelho.

4.3 Influência da dosagem de cimento

4.3.1 Argamassas de cimento

Tendo como base os subgrupos da tab. 4.1, foram efectuados estudos relativos à influência do volume de cimento nos traços das várias amassaduras. Os grupos das argamassas de cimento estão identificados nessa tabela como Grupos 1, 2 e 3. Dado que os resultados experimentais foram idênticos nos três grupos, apresentar-se-á a título de exemplo a análise dos resultados experimentais para o Grupo 1, sendo os restantes resultados apresentados no Anexo A.

Grupo 1

Na fig. 4.24 apresentam-se as curvas higroscópicas das argamassas do Grupo 1, constituído pelas argamassas A1, A4 e A5.

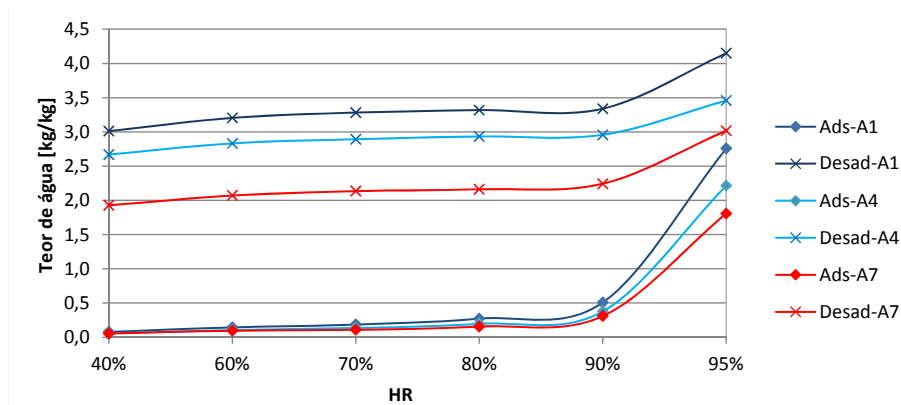


Fig. 4.24: Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do Grupo 1.

Da fig. 4.24 constata-se que ao longo de todo o ciclo de adsorção/desadsorção a argamassa A1 é a que apresenta maiores valores de teor de água em equilíbrio, seguida pela argamassa A4 e por fim pela A7. De modo a justificar esta ordem, efectuou-se uma análise à estrutura porosa de cada uma das amassaduras. Na fig. 4.25 apresentam-se as distribuições dos diâmetros dos poros para cada uma das amostras.

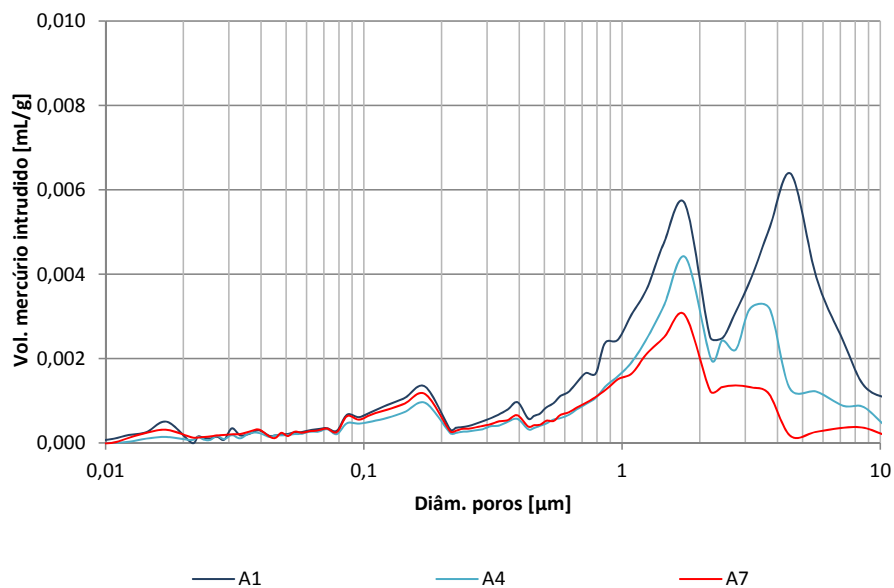
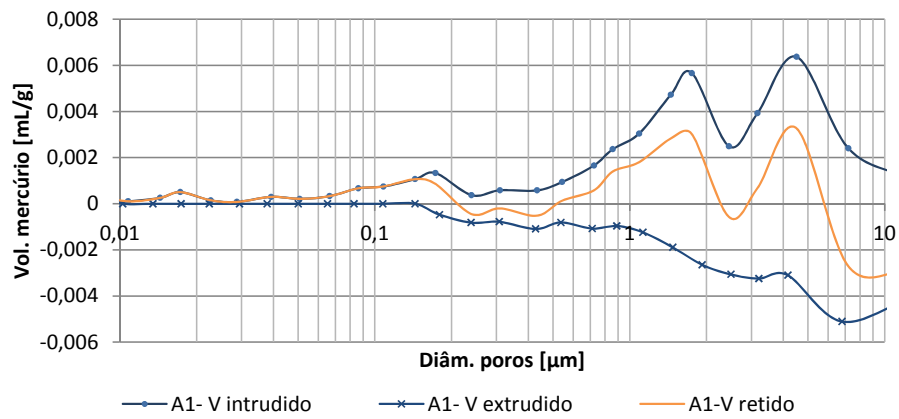


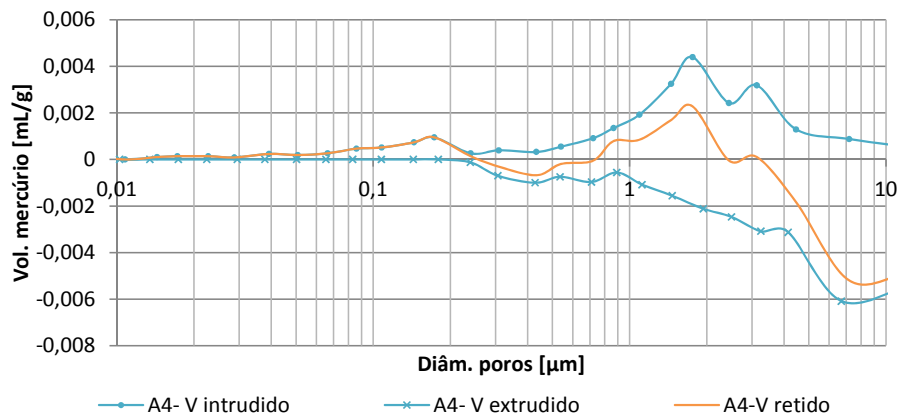
Fig. 4.25: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do Grupo 1.

Observa-se o facto da argamassa A1 apresentar maior volume de poros em praticamente toda a gama de diâmetros analisada. Relativamente às argamassas A4 e A7, estas apresentam maiores diferenças a partir do diâmetro de 1 μm , onde se observa um maior volume de poros para a argamassa A4 quando comparada com a A7.

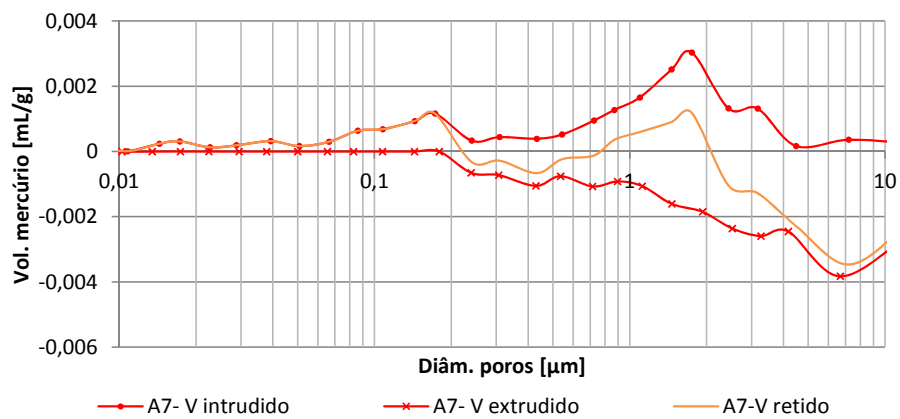
Apresentam-se, na fig. 4.26, as relações entre o volume incremental intrudido e extrudido para as três amostras.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A1.



(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A4.

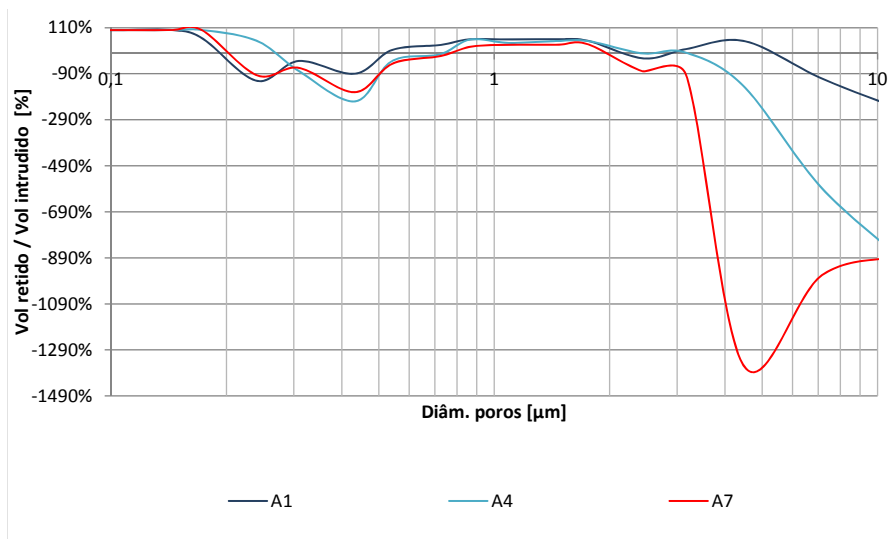


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A7.

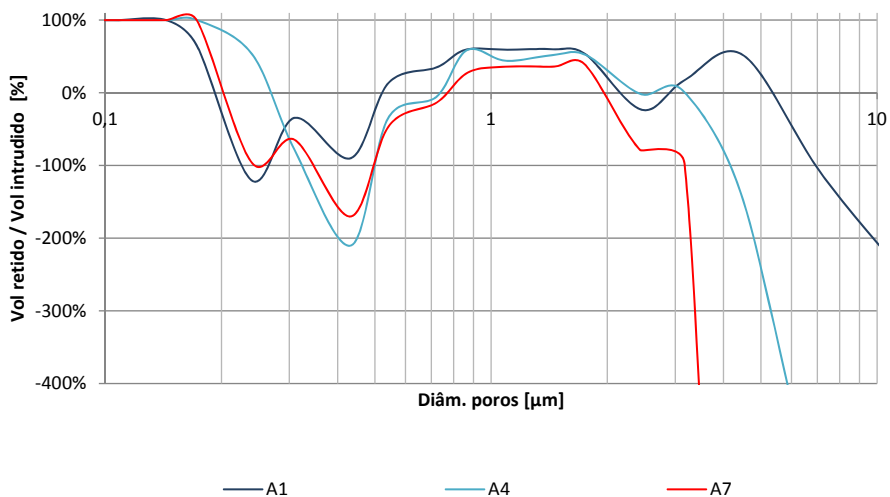
Fig. 4.26: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do Grupo 1.

Após análise da fig. 4.26 conclui-se que até $0,2\ \mu\text{m}$ todas as amostras apresentam uma retenção de 100% do volume intrudido. Deve ser referida a clara presença de poros do tipo tinteiro entre 1 e $2\ \mu\text{m}$ para todas as amostras, e, para a argamassa A1, a presença deste tipo de poros também na gama de diâmetros entre os 4 e $5\ \mu\text{m}$.

De modo a poder relacionar os dados de cada uma das argamassas, precedeu-se à análise da relação entre os volumes retido e intrudido, apresentado na fig. 4.27, e da relação entre os volumes retido em cada diâmetro e o total intrudido na amostra, presentes na fig. 4.28.



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido .

Fig. 4.27: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do Grupo 1.

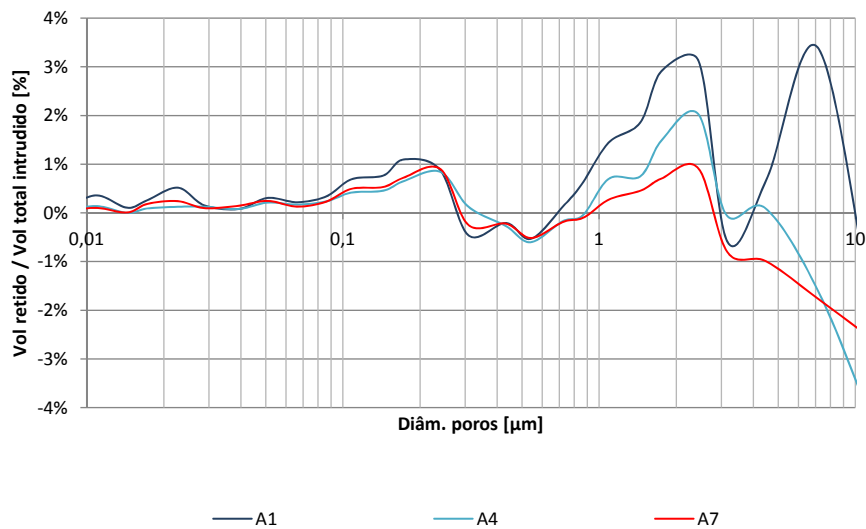
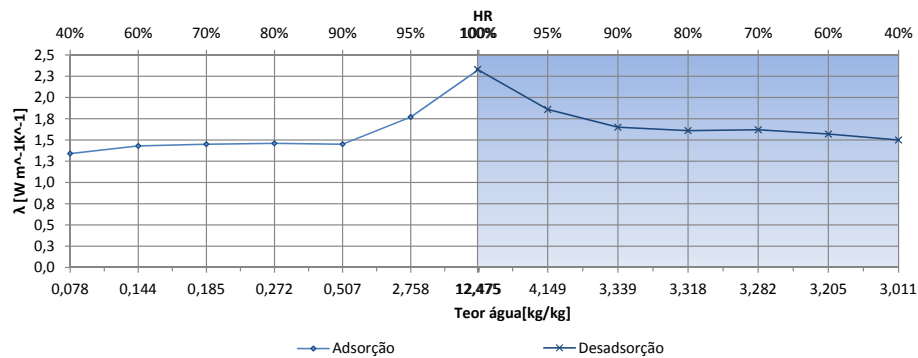


Fig. 4.28: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do Grupo 1.

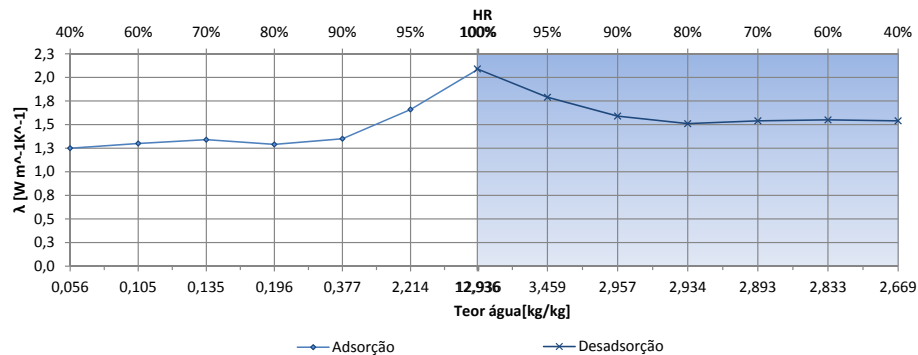
Uma análise conjunta das figuras 4.27 e 4.28 permite concluir, de forma inequívoca, que a argamassa A1 é a que apresenta maior retenção, na medida em que é a argamassa cujos volumes de mercúrio retido em cada poro apresentam maior representatividade na amostra, para praticamente toda a gama de diâmetros estudada (fig 4.28). Pode-se ainda observar na fig. 4.27 que a relação entre o volume retido e o volume intrudido apresenta praticamente sempre valores superiores à das restantes amostras. Relativamente às argamassas A4 e A7, da fig. 4.28 constata-se um comportamento semelhante entre as amostras até ao diâmetro de $0,9 \mu\text{m}$. A partir deste valor o volume de poros da argamassa A4 apresenta maior representatividade que os da argamassa A7. A esta informação acresce ainda o facto de para a mesma gama de poros, a argamassa A4 apresentar uma maior relação de volume retido por volume intrudido em cada diâmetro, apresentando assim uma maior retenção que a argamassa A7. Justifica-se assim, com base na informação obtida pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, as posições das curvas higroscópicas para cada uma das amostras.

Condutibilidade térmica

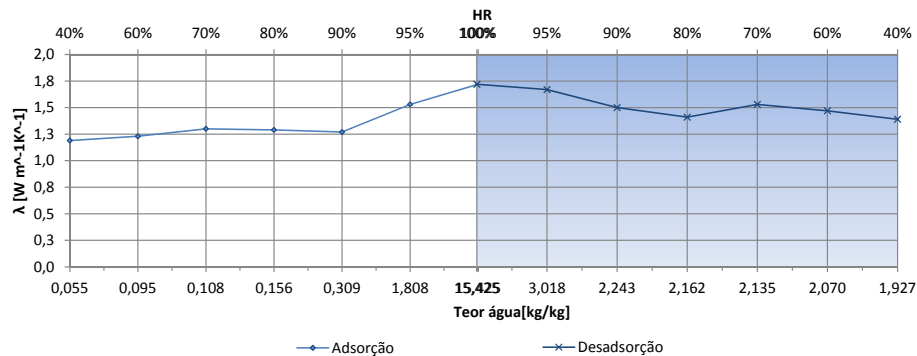
Na fig. 4.29 estão ilustrados os resultados das medições de condutibilidade térmica com a variação da humidade relativa e respectivos teores de água em equilíbrio para as três amostras.



(a) Argamassa A1.



(b) Argamassa A4.



(c) Argamassa A7.

Fig. 4.29: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do Grupo 1.

Como se pode constatar da análise da fig. 4.29, a observação da posição das curvas higroscópicas de cada uma das argamassas (fig 4.24) reflecte-se nos valores da condutibilidade térmica, sendo que a argamassa com maior teor de água em equilíbrio, a argamassa A1, é a que apresenta maiores valores de condutibilidade térmica seguida da argamassa A4 e por fim da A7. Importa ainda referir o facto de em alguns casos se observarem aumentos de cerca de 20% do valor da condutibilidade térmica na fase desadsorção comparativamente com as mesmas condições na fase de adsorção. Esta ocorrência pode ser justificada através dos fenómenos explicados na Secção 3.2.3.

Análise geral

Para todos os grupos testados nas argamassas de cimento observa-se que um maior volume de cimento nas amassaduras implica um maior volume de poros inferiores a $10\ \mu\text{m}$, sendo que este aumento é seguido de um incremento do volume retido nesta gama de poros. Deste modo, com base nos resultados experimentais ilustrados na fig. 4.24 e 4.26, é plausível afirmar que um maior volume de cimento nos traços deste tipo de argamassas, implica maiores efeitos histeréticos, os quais se reflectem nos valores de condutibilidade térmica apresentados na fig. 4.29.

4.3.2 Argamassas bastardas

Na tab. 4.1 observa-se que os subgrupos das argamassas bastardas estão identificados como Grupos 4, 5 e 6. Analogamente ao efectuado para o grupo de argamassas de cimento, também nesta secção será analisado apenas um dos três grupos intervenientes, o Grupo 4, sendo os resultados dos restantes grupos apresentados no Anexo A.

Grupo 4

O Grupo 4 é constituído por três argamassas identificadas como A10, A13 e A16. Na fig. 4.30 apresentam-se as curvas higroscópicas de cada uma das argamassas do grupo em questão.

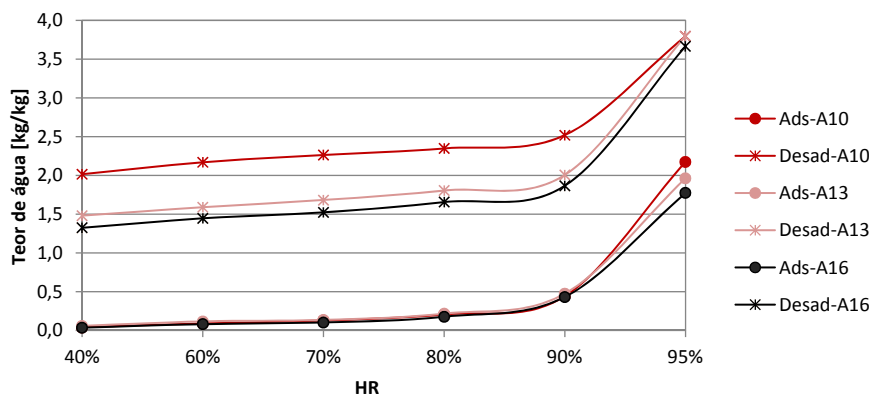
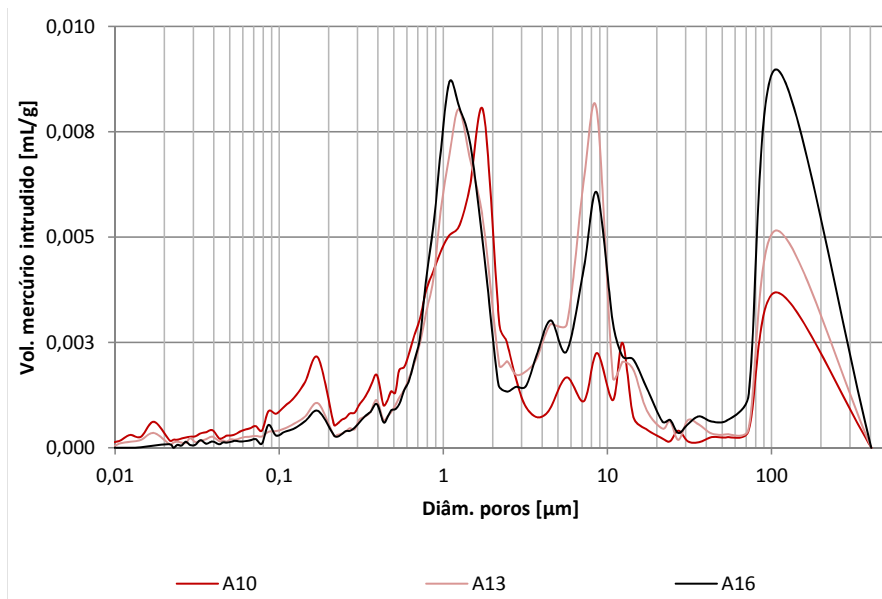
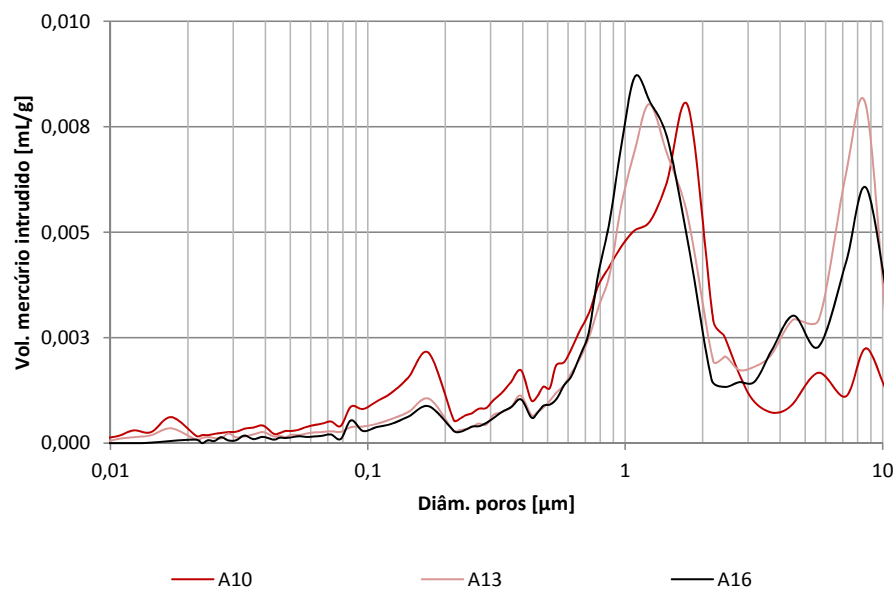


Fig. 4.30: Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do Grupo 4.

De forma semelhante ao grupo das argamassas de cimento, também para as bastardas se constata que as argamassas com maior volume de cimento são as que apresentam valores de teores de água em equilíbrio superiores.



(a) Distribuição de diâmetros de poros.

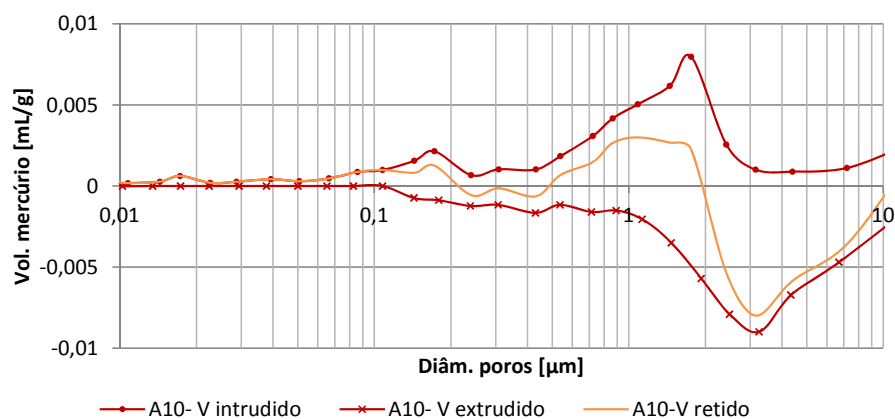


(b) Pormenor da distribuição de diâmetros de poros.

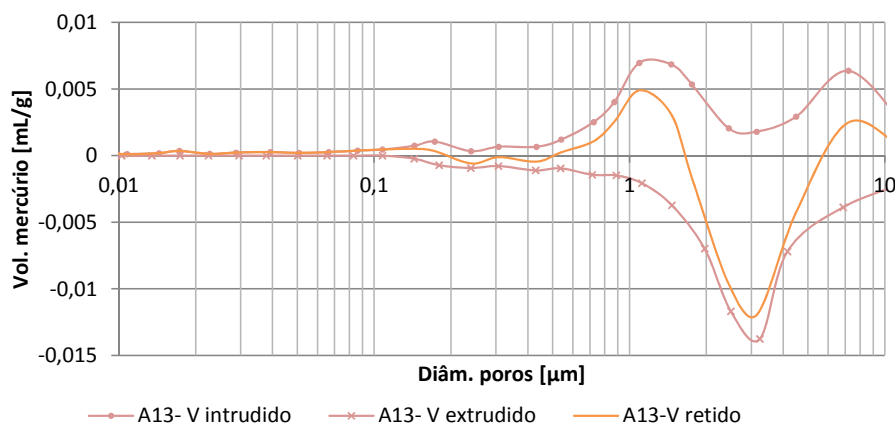
Fig. 4.31: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do Grupo 4.

Analisando a distribuição de diâmetros de poros apresentada na fig. 4.31, observa-se que até sensivelmente $0,8 \mu\text{m}$ a argamassa A10 apresenta valores superiores às restantes. Refere-se ainda o facto de que para $8 \mu\text{m}$ se observar um maior volume de poros da argamassa A13 face às restantes.

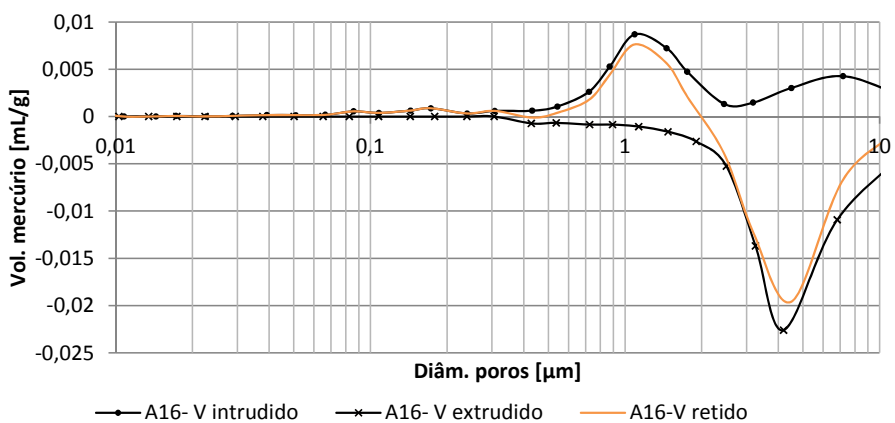
Apresentam-se na fig. 4.32 a relação entre o volume intrudido e o extrudido para as argamassas A10, A13 e A16.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A10.



(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A13.

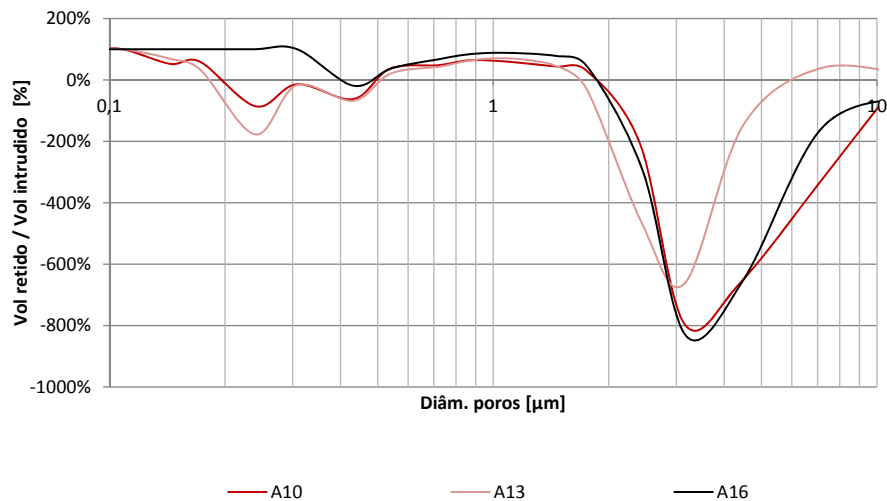


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A16.

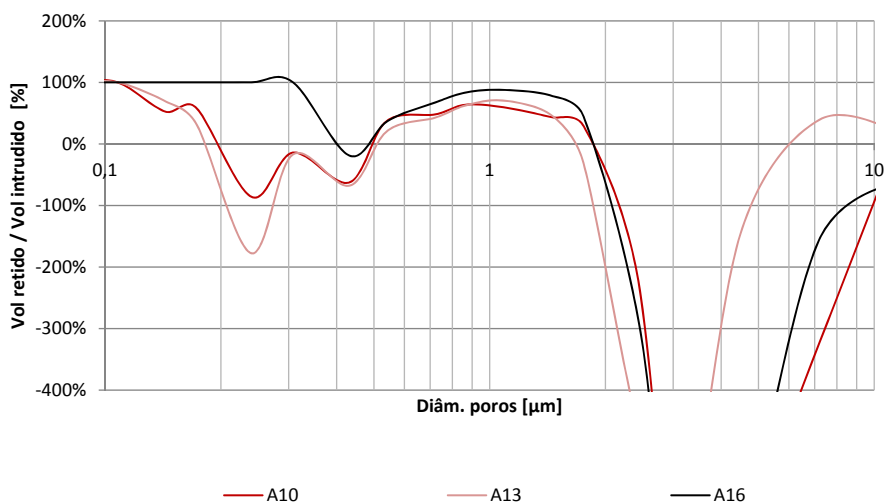
Fig. 4.32: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do Grupo 4.

Da análise da fig. 4.32 é possível constatar a existência de diferentes comportamentos entre as três argamassas. De notar que, para a argamassa A10, o maior volume de poros na gama dos $0,2 \mu\text{m}$ apresenta também um maior volume retido, indicando assim a presença de poros tipo tinteiro para o diâmetro referido. Com a diminuição de pressão observa-se que, entre os 1 e $2 \mu\text{m}$, as três amostras apresentam elevados valores de volume retido seguidos de uma extrusão excessiva do mercúrio retido, anteriormente.

Para a facilitar a análise apresentam-se nas figuras 4.33 e 4.34, respectivamente, a relação entre o volume retido e o intrudido em cada diâmetro e a relação entre o volume retido e o total intrudido na amostra.



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido.

Fig. 4.33: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de bastardas do Grupo 4.

Numa primeira análise da fig. 4.33 a argamassa A16 apresenta uma maior retenção quando comparada

com as restantes, deve no entanto ter-se em conta o inferior volume de poros com diâmetros inferiores a $0,2 \mu\text{m}$ para esta amostra. Tendo em conta o anteriormente mencionado é expectável que a extrusão de mercúrio que ficou retido ocorra numa fase posterior às restantes amostras.

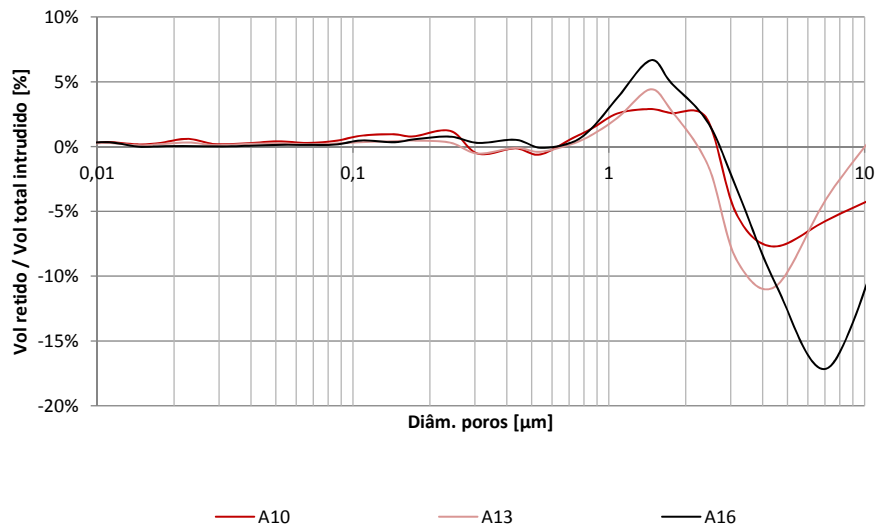
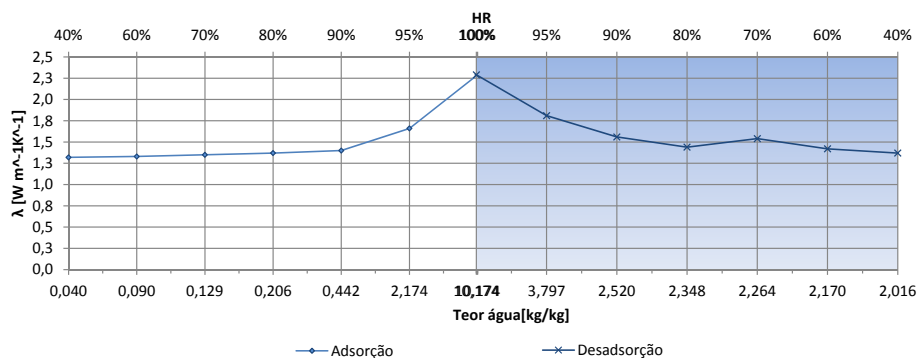


Fig. 4.34: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de bastardas do Grupo 4.

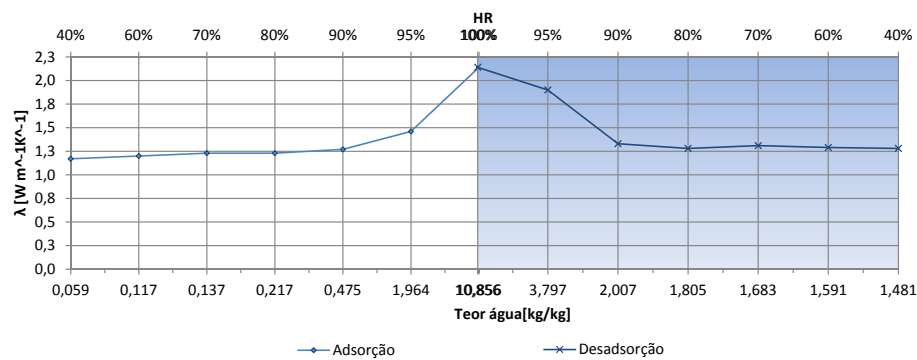
Analisando, através da fig. 4.34, a representatividade dos diâmetros para cada amostra observa-se que, para diâmetros inferiores a $0,3 \mu\text{m}$, a argamassa A10 apresenta maior representatividade. No entanto, para este tipo de argamassas, a tentativa de relacionar o volume retido com o posicionamento das curvas higroscópicas revelou-se inconclusivo.

Condutibilidade térmica

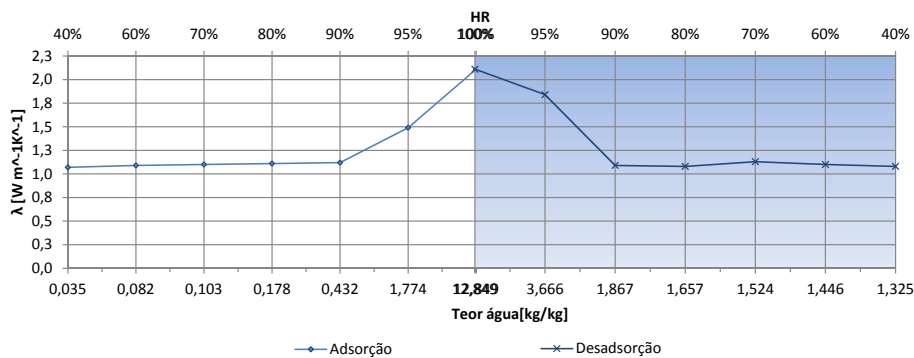
A fig. 4.35 ilustra a influência do teor em água na condutibilidade térmica das argamassas do presente grupo.



(a) Argamassa A10



(b) Argamassa A13



(c) Argamassa A16

Fig. 4.35: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de bastardas do Grupo 4.

Cruzando a informação entre a fig. 4.35 e a posição das curvas higroscópicas das três argamassas, observa-se, como seria expectável, que a argamassa A10 apresenta maiores valores de condutibilidade térmica durante a fase de desadsorção, seguida pela argamassa A13 e por fim a A16.

Análise geral

Apesar da relação entre a posição das curvas higroscópicas e os resultados gerados pela análise de porosimetria se revelar inconclusiva, é possível observar que, analogamente à situação verificada na Secção 4.3.1, também para as argamassas bastardas se observou o facto de maior volume de cimento implicar efeitos histeréticos mais evidentes, tendo mais uma vez, este facto, efeito directo na condutibilidade das amostras.

4.4 Influência do volume água

4.4.1 Argamassas de cimento

Na tab. 4.2 observa-se que os grupos de argamassas de cimento são os denominados por A, B e C. Dada a semelhança nos resultados obtidos efectuou-se uma análise aos dados obtidos, para o Grupo A, enquanto os restantes resultados se encontram apresentados no Anexo B.

Grupo A

O Grupo A é constituído pelas argamassas A1, A2 e A3. Apresentam-se na fig. 4.36 os comportamentos higroscópicos das três amostras.

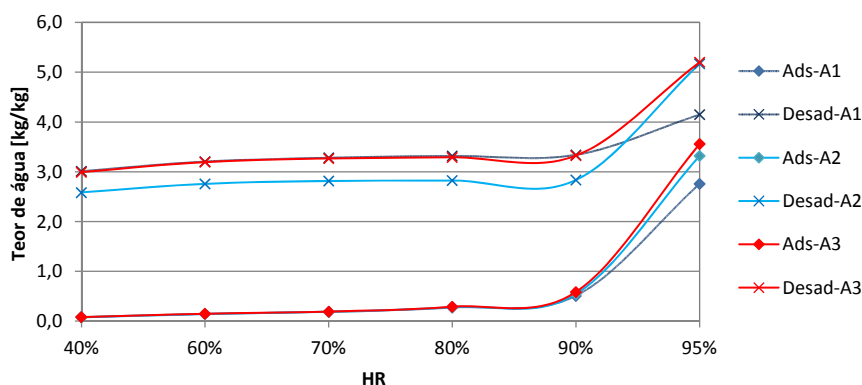


Fig. 4.36: Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do Grupo A.

A análise da fig. 4.36 permite concluir que em fase de adsorção até 90% de humidade relativa todas as amostras do grupo apresentam valores idênticos de teor de água em equilíbrio. Para valores de humidade relativa superiores a 90% verifica-se que um maior volume de água nas amassaduras se reflecte em valores superiores de teor de água. Relativamente à fase de desadsorção, não é possível estabelecer uma relação directa entre a ordem pela qual se apresentam as curvas das três amostras e o volume de água utilizado durante o fabrico das amostras.

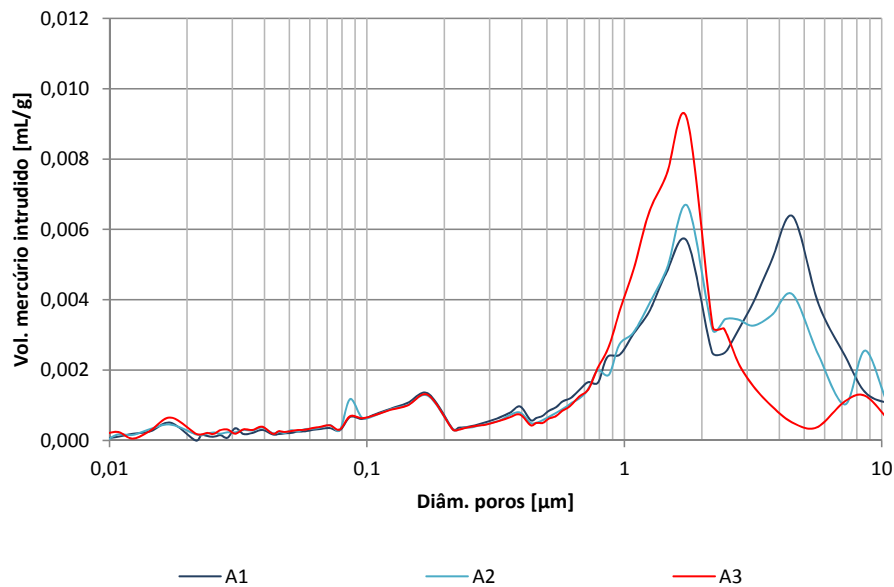
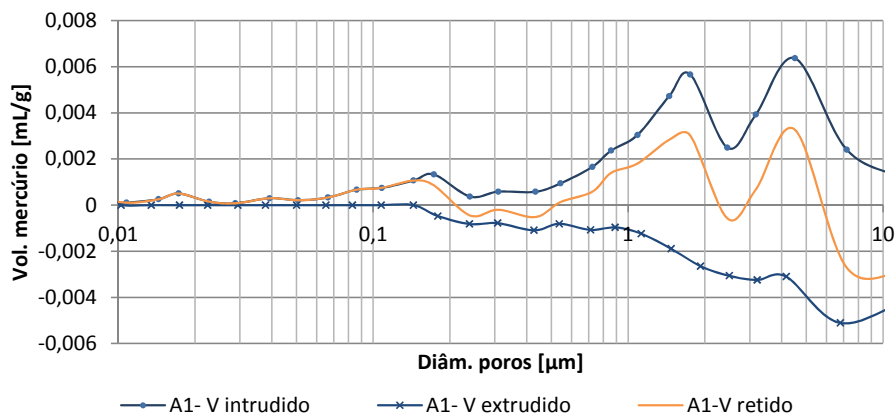


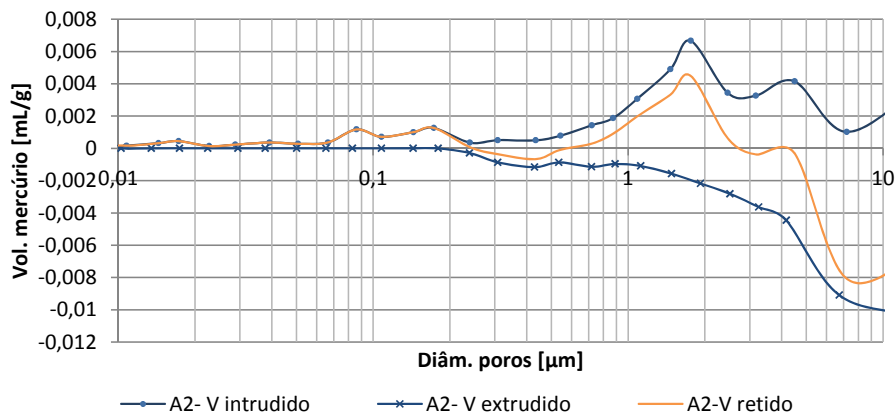
Fig. 4.37: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do Grupo A.

Com base na fig. 4.37 pode-se observar que o volume de poros na gama entre 1 e 2 μm é tanto maior, quanto maior o volume de água presente nas amassaduras. De notar que este facto foi verificado em todos os grupos de argamassas de cimento analisados.

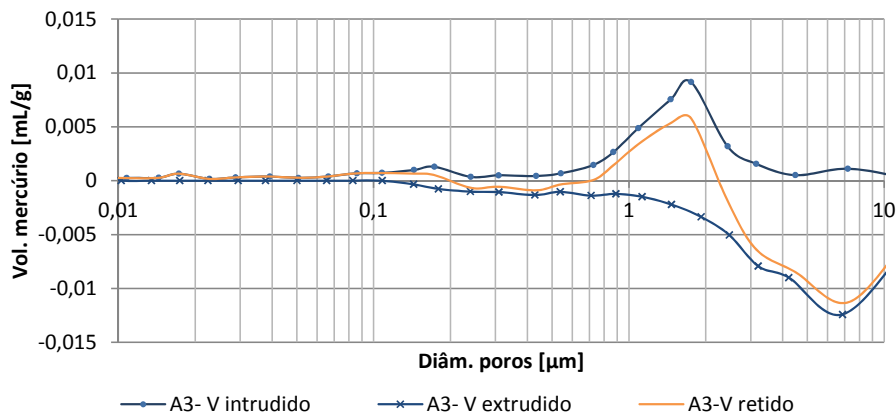
Na fig. 4.38 apresentam-se as relações entre o volume intrudido e extrudido nas argamassas do Grupo A.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A1.



(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A2.

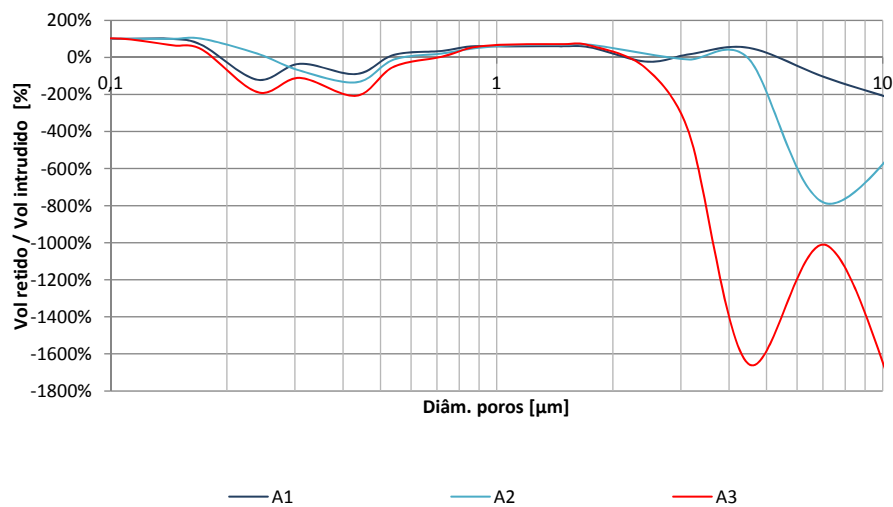


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A3.

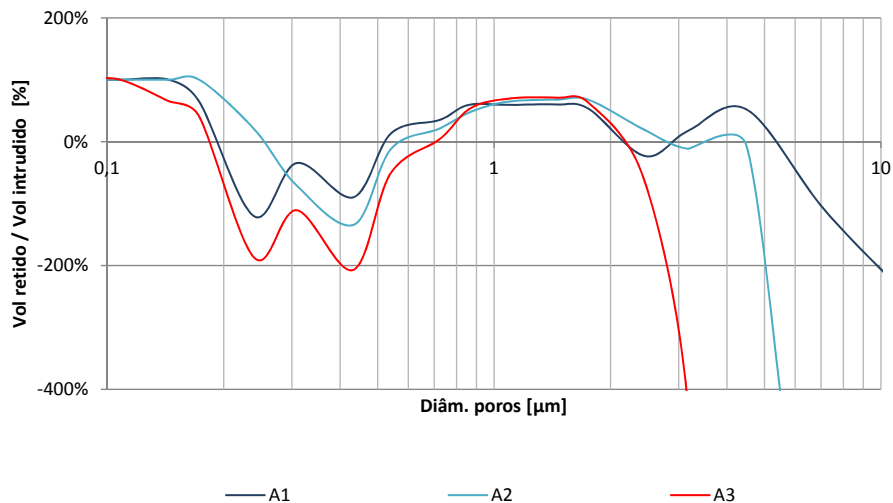
Fig. 4.38: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do Grupo A.

É um facto comum aos três Grupos, A, B e C, de que para a gama de diâmetros anteriormente mencionada, todas as argamassas apresentem volumes retidos bastante elevados. Para o Grupo A deve referir-se a particularidade de que para 4,5 μm o aumento do volume de água no traço se reflectir na diminuição do volume de poros e na consequente diminuição do volume retido.

A fig. 4.39 ilustra a relação entre o volume intrudido em cada poro e o respectivo valor retido na extrusão.



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido .

Fig. 4.39: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do Grupo A.

Analisando a fig. 4.39 constata-se que, como referido anteriormente, na gama entre 1 e 2 μm todas as amostras apresentam retenções bastante elevadas. Deve ainda referir-se que, para o Grupo A, se observou que um maior volume de água se reflecte no facto da extrusão do mercúrio retido para diâmetros inferiores a 2 μm ocorrer primeiro para as argamassa mais ricas em água no seu traço: a argamassa A3, seguida pela A2 e por último a A1.

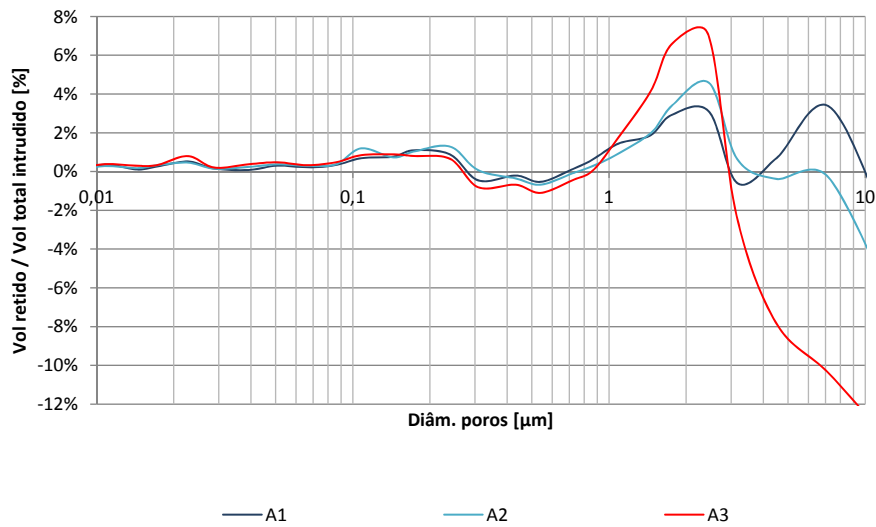
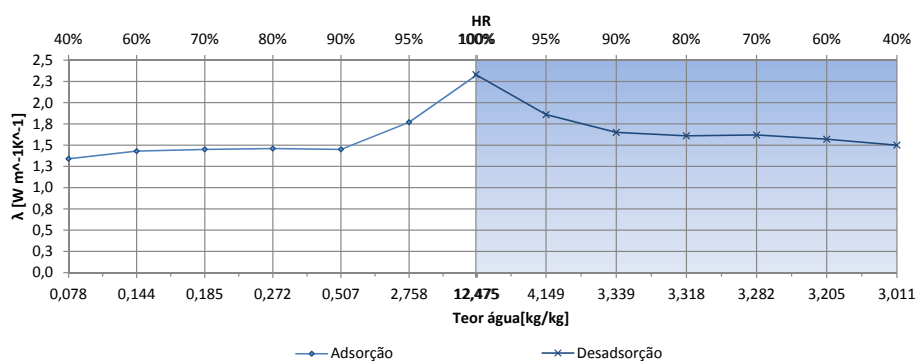


Fig. 4.40: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do Grupo A.

Relativamente à representatividade dos poros, observa-se que as três amostras apresentam grandes semelhanças até ao diâmetro de $1 \mu\text{m}$, valor a partir do qual se constata diferenças notórias, as quais têm uma relação directa com a informação retirada da fig. 4.37.

Condutibilidade térmica

Apresentam-se na fig. 4.41 o comportamento em termos de condutibilidade térmica durante as fases de adsorção e desadsorção das três argamassas constituintes do Grupo A.



(a) Argamassa A1

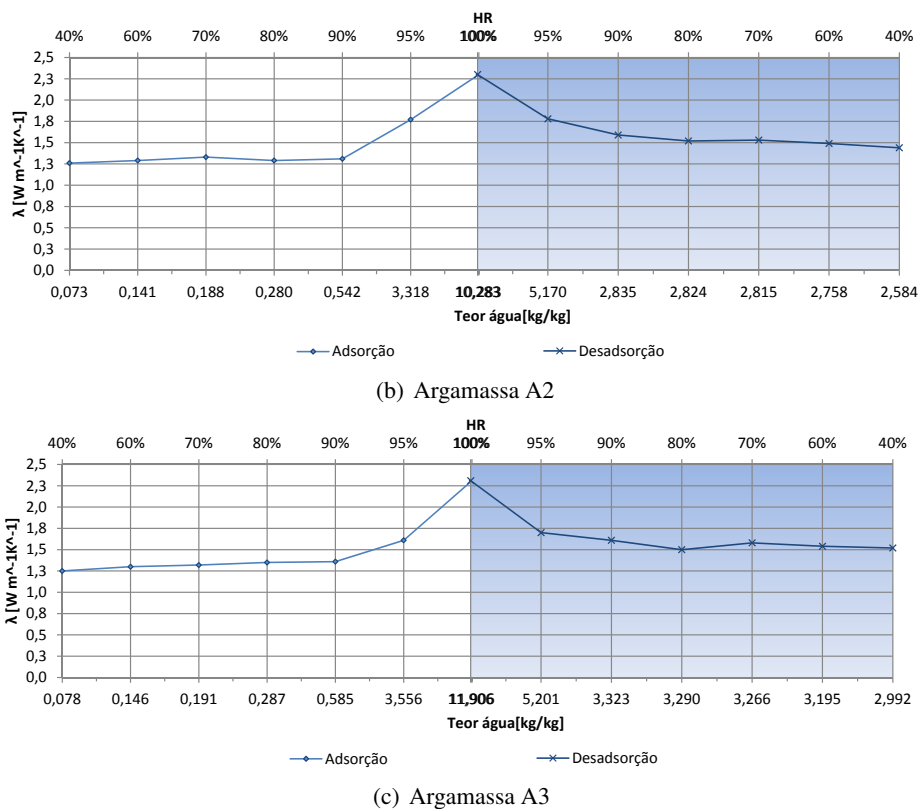


Fig. 4.41: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do Grupo A.

Em todas as amostras é visível a influência do efeito histerético entre a adsorção e desadsorção na condutibilidade térmica de cada argamassa, sendo que em alguns casos se constata, durante a fase de desadsorção, um aumento de 21% deste parâmetro, face ao mesmo valor de humidade relativa em fase de adsorção.

Análise geral

Como referido anteriormente, a influência do volume de água utilizado no processo de fabrico das argamassas desempenha um papel importante uma vez condiciona a estrutura porosa do material, a qual se reflecte nos processos de adsorção e desadsorção e, consequentemente, nos valores de condutibilidade térmica.

4.4.2 Argamassas bastardas

Os grupos de argamassas bastardas apresentam-se na tab. 4.2 e estão identificados como D, E e F. Também para o presente conjunto se efectuou a análise de apenas um grupo, o Grupo D, sendo que os restantes resultados são apresentados no Anexo B.

Grupo D

Na fig. 4.42 apresentam-se as curvas higroscópicas de cada uma das argamassas do grupo em análise.

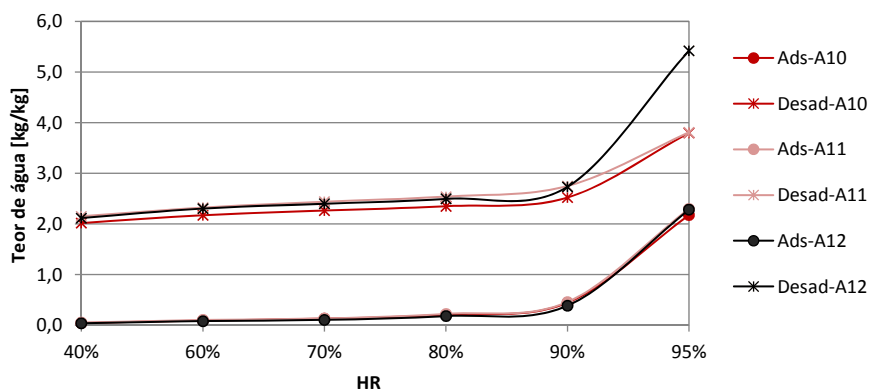


Fig. 4.42: Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do Grupo D.

Da análise da fig. 4.42 é possível observar que em fase de adsorção as três amostras apresentam comportamentos bastante semelhantes. Em fase de desadsorção constata-se alguma diferenças para humidades relativas elevadas.

Analisando a distribuição de poros de cada uma das amostras (fig 4.43), é possível concluir que, quanto maior o volume de água no traço da amostra, maior o volume de poros na gama entre 1 e 2 μm .

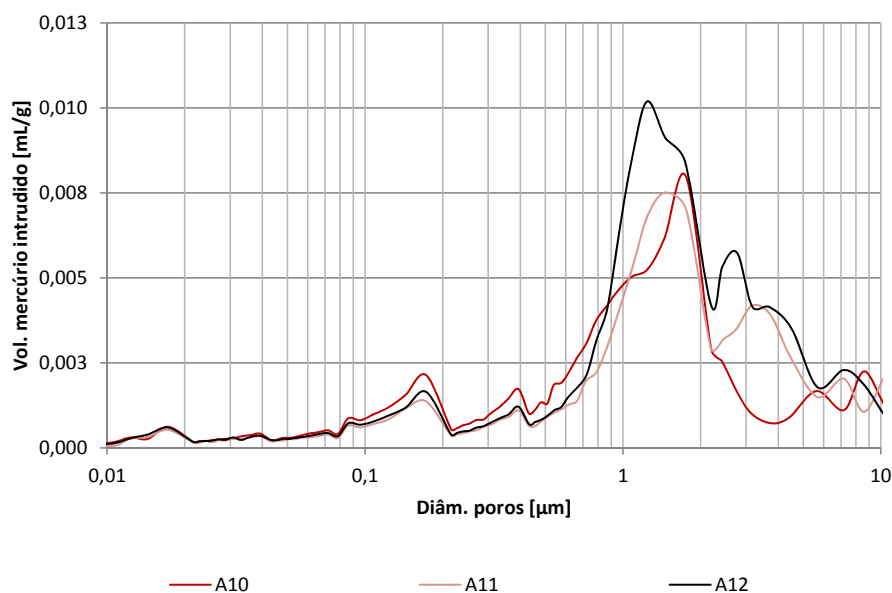
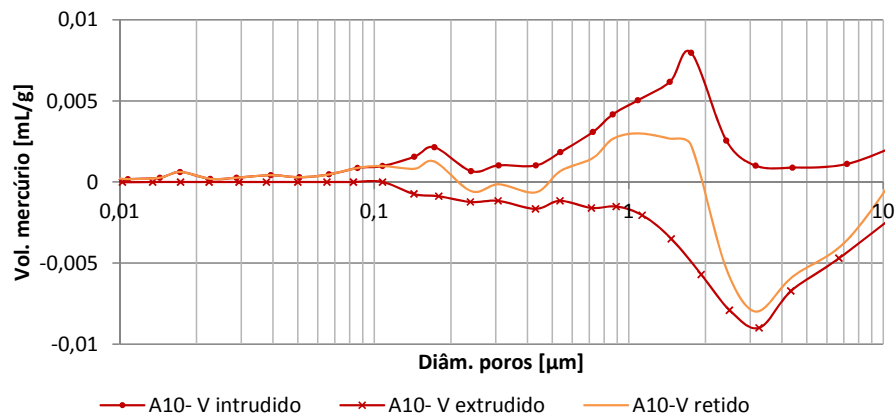
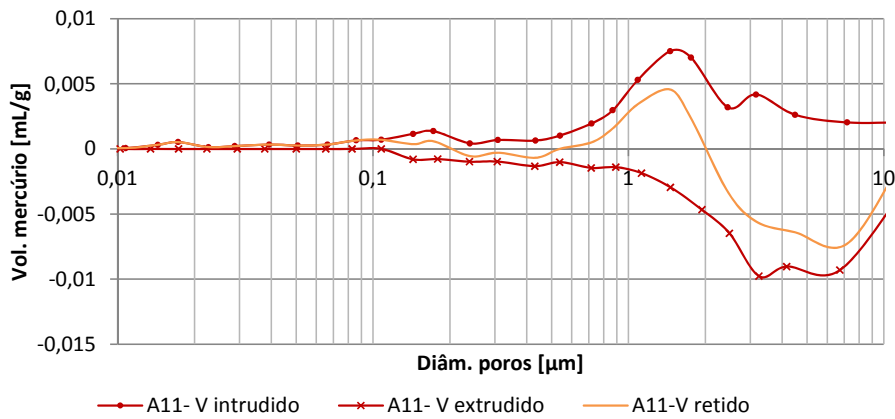


Fig. 4.43: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do Grupo D.

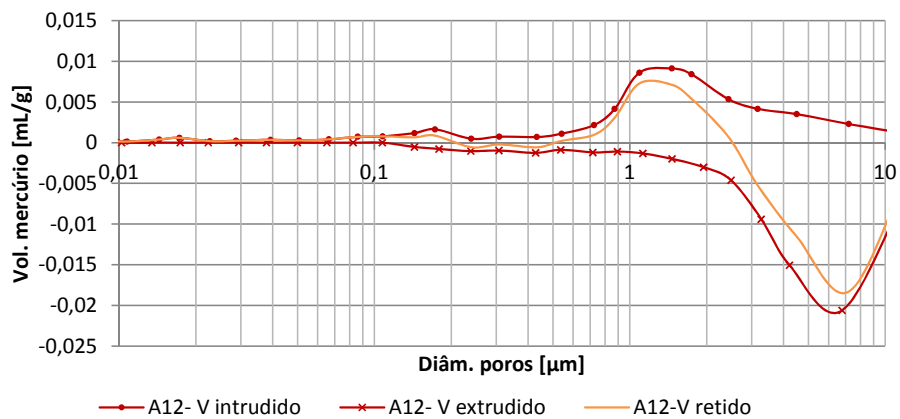
Apresenta-se na fig. 4.44 a relação entre o volume intrudido e o extrudido para as argamassas A10, A11 e A12.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A10.



(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A11.

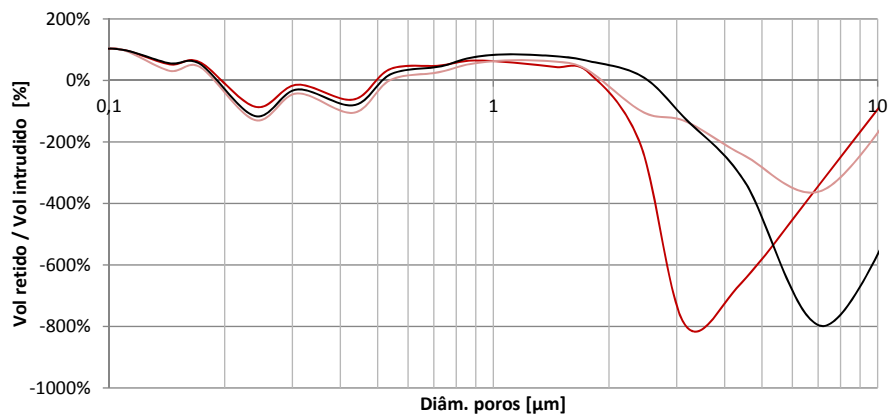


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A12.

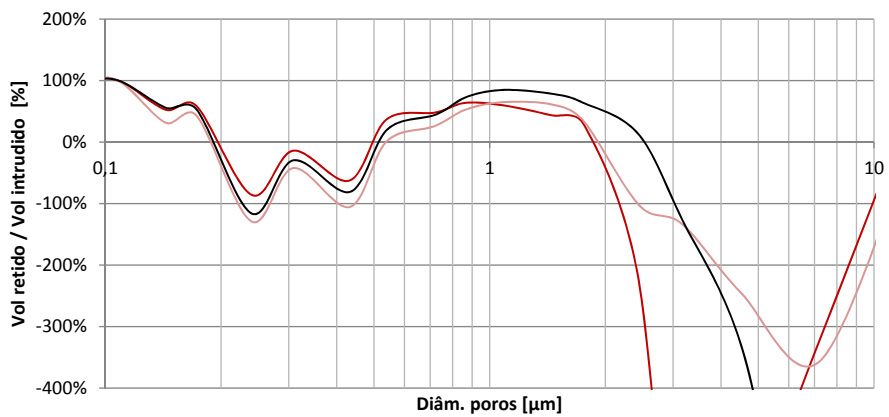
Fig. 4.44: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do Grupo D.

Analogamente às argamassas de cimento, também para as argamassas bastardas se verifica o facto de os maiores volumes de poros entre 1 e 2 μm implicarem também maiores volumes retidos seguidos por uma extrusão de declive bastante acentuado.

De modo a relacionar os dados da fig. 4.44, apresentam-se nas figuras 4.45 e 4.46, respectivamente, a relação entre o volume retido e o intrudido em cada diâmetro e a relação entre o volume retido e o total intrudido na amostra.



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido.

Fig. 4.45: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas bastardas do Grupo D.

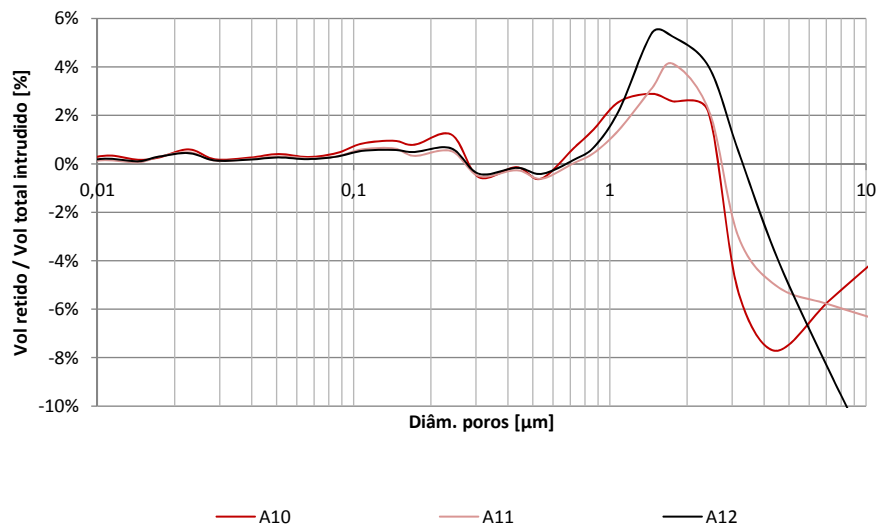
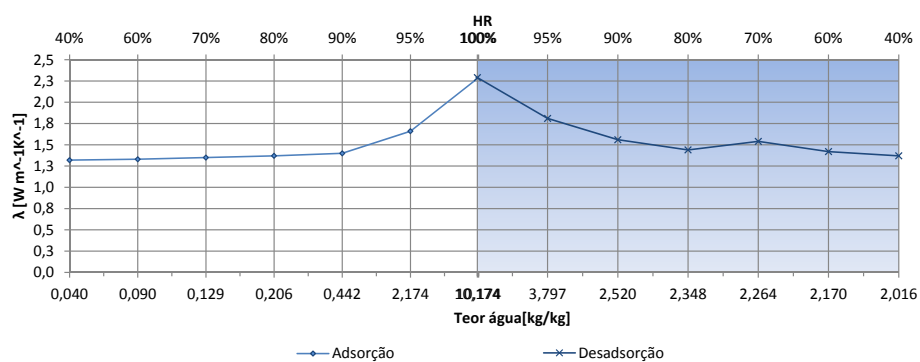


Fig. 4.46: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas bastardas do Grupo D.

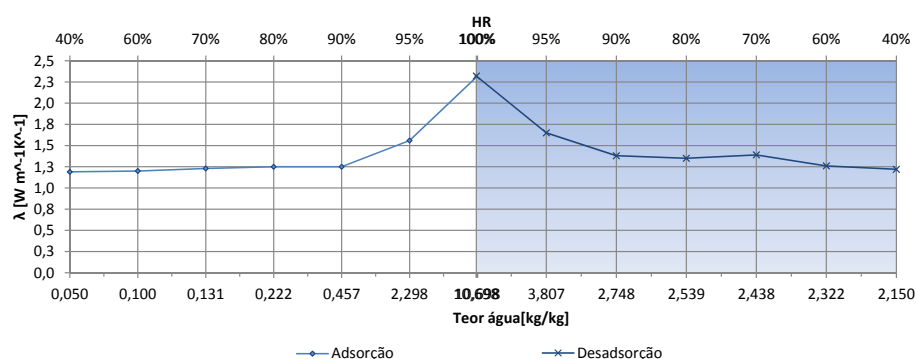
A análise comparativa das amostras A10, A11 e A12 revelou-se inconclusiva, uma vez que não foi possível estabelecer uma ligação entre a posição das curvas higroscópicas e as relações entre a informação fornecida pelas figuras 4.45 e 4.46.

Condutibilidade térmica

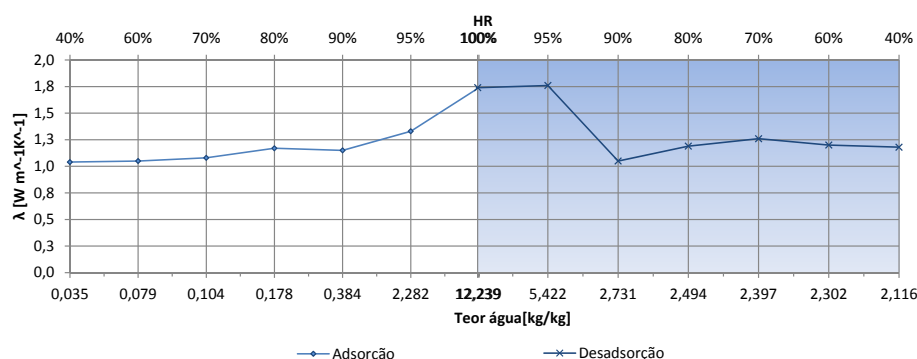
A fig. 4.47 ilustra a influência do teor em água na condutibilidade térmica das argamassas do presente grupo.



(a) Argamassa A10



(b) Argamassa A11



(c) Argamassa A12

Fig. 4.47: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas bastardas do Grupo D.

Da análise da fig. 4.47 observa-se que todas as amostras apresentam aumentos de condutibilidade térmica, para os mesmos valores de humidade relativa, entre as fases de adsorção e desadsorção. Estas diferenças são mais evidentes para a argamassa A12, a qual para 90% de humidade relativa, em fase de desadsorção, chega a apresentar um valor de condutibilidade térmica 8% inferior ao mesmo valor de humidade relativa durante a adsorção. Este facto pode ser justificado tendo como base a fig. 3.9 da Secção 3.2.3.

Análise geral

A análise de resultados da influência do volume de água utilizado nas amassaduras das argamassas bastardas revelou-se inconclusiva. Da análise das curvas observam-se algumas diferenças, nomeadamente para valores de humidade relativa elevados, no entanto não é possível identificar um padrão na análise dos três grupos constituintes das argamassas bastardas.

Capítulo 5

Modelos numéricos de análise das curvas higroscópicas

5.1 Modelos 1 e 2

Na literatura podem-se encontrar diversos modelos numéricos que visam descrever, com base em parâmetros matemáticos, as curvas higroscópicas de materiais de construção [11]. Neste estudo foram utilizados dois modelos sugeridos por Hansen [15]: modelo 1 (eq. 5.1) e modelo 2 (eq. 5.2).

$$W = a \left(1 - \frac{\ln(\Phi)}{b} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (5.1)$$

$$W = \frac{\Phi}{A\Phi^2 + B\Phi + C} \quad (5.2)$$

Onde Φ representa o valor de humidade relativa, W o teor de água, a , b , c e A , B , C as constantes características de cada material.

Para elaborar a parametrização das curvas experimentais recorreu-se a um *software* denominado *LABFIT*, que permitiu efectuar regressões não lineares com base em modelos matemáticos pré-estabelecidos.

5.1.1 Parametrização das curvas de cada material

Os resultados obtidos para a parametrização das curvas de adsorção e desadsorção, para cada um dos materiais analisados, estão apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2 respectivamente.

Tab. 5.1: Parâmetros dos modelos 1 e 2 para a fase de adsorção.

Materiais	Modelo 1			Modelo 2		
	a	b	c	A	B	C
Pedra natural	25,365	0,00022	0,964	-479,470	599,826	-126,816
Tij. refractário	84,818	0,027	0,210	-542,800	687,700	-161,600
Estuque	718,799	0,018	0,255	-63,971	77,538	-15,679
Tij. furado	440,168	0,007	0,455	-6,718	-2,072	8,244
XPS	11560,530	0,003	0,342	-69,230	88,180	-20,940
EPS	2,156	0,031	1,084	-44,610	59,169	-15,009
Lã - mineral	113,940	0,008	0,392	-185,123	243,940	-63,480
Aglom. cort.	6,433	0,282	0,710	-2,184	2,724	-0,448
Betão celular	866,492	0,012	0,407	-7,726	8,791	-1,309
A1	249,000	0,009	0,429	-39,140	46,390	-8,397
A2	161,300	0,018	0,348	-37,100	43,290	-7,344
A3	156,000	0,019	0,341	-34,440	39,890	-6,544
A4	137,500	0,013	0,379	-53,800	63,650	-11,450
A5	154,400	0,012	0,389	-53,850	64,210	-11,960
A6	123,200	0,016	0,363	-47,860	54,660	-8,335
A7	110,200	0,014	0,378	-68,550	82,800	-16,270
A8	164,600	0,009	0,427	-55,820	65,010	-10,880
A9	121,300	0,014	0,379	-54,470	62,530	-9,791
A10	218,400	0,007	0,457	-37,370	38,570	-2,471
A11	220,900	0,008	0,450	-38,680	42,003	-4,579
A12	140,030	0,015	0,361	-46,070	48,270	-3,859
A13	697,910	0,002	0,559	-36,416	40,200	-4,842
A14	291,100	0,005	0,488	-36,036	35,930	-1,142
A15	201,230	0,007	0,457	-36,870	38,230	-2,615
A16	458,650	0,003	0,540	-29,585	24,127	4,315
A17	420,970	0,003	0,523	-34,044	33,007	-0,136
A18	253,600	0,006	0,477	-24,480	13,433	9,816

Tab. 5.2: Parâmetros dos modelos 1 e 2 para a fase de desadsorção.

Materiais	Modelo 1			Modelo 2		
	a	b	c	A	B	C
Pedra natural	0,281	0,008	2,179	-64,606	81,442	-10,580
Tij. refractário	1423,0	0,012	0,280	-59,548	72,499	-14,892
Estuque	-	-	-	-	-	-
Tij. furado	1371,6	0,003	0,557	-9,234	8,721	0,203
XPS	676,28	0,004	0,519	-14,374	13,657	0,217
EPS	535,50	0,045	0,170	-56,494	73,193	-18,393
Lã - mineral	-	-	-	-	-	-
Aglom. cort.	27,426	0,064	0,706	-3,342	4,323	-1,019
Betão celular	52158,6	0,003	0,389	-4,207	3,259	0,745
A1	3,836	0,612	3,231	-0,317	0,637	-0,073
A2	6,071	0,021	3,741	-1,322	1,891	-0,396
A3	4,464	0,791	1,381	-0,777	1,186	-0,220
A4	3,328	0,278	6,017	-0,255	0,662	-0,052
A5	3,343	0,821	1,844	-0,662	1,104	-0,175
A6	3,838	0,739	1,828	-0,660	1,068	-0,179
A7	2,715	0,728	1,895	-0,810	1,348	-0,206
A8	2,935	0,784	1,506	-0,960	1,515	-0,257
A9	3,364	0,593	1,217	-1,161	2,312	-0,472
A10	3,712	0,678	1,217	-1,253	1,893	-0,343
A11	3,466	0,692	1,347	-0,957	1,452	-0,246
A12	4,786	0,500	0,842	-2,214	3,009	-0,670
A13	3,401	0,503	0,832	-2,997	4,069	-0,891
A14	3,861	0,454	0,798	-3,286	4,425	-1,003
A15	11,278	0,032	1,233	-5,511	7,288	-1,787
A16	3,310	0,464	0,793	-3,573	4,808	-1,066
A17	6,250	0,030	1,702	-4,821	6,418	-1,499
A18	6,387	0,030	1,598	-5,390	7,156	-1,683

Nos subcapítulos seguintes ilustram-se exemplos comparativos entre a curva de adsorção experimental e os dois modelos matemáticos.

Isolantes

Da análise da tab. 5.3 e da fig. 5.1 conclui-se que, tanto para a adsorção como para a desadsorção, o modelo 2 adapta-se melhor às curvas higroscópicas deste material.

Tab. 5.3: Valores experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o XPS.

HR	Experimental		Modelo 1		Modelo 2	
	Adsorção	Desadsorção	Adsorção	Desadsorção	Adsorção	Desadsorção
40%	0,026	1,187	0,006	0,734	0,035	1,263
60%	0,073	1,282	0,019	1,042	0,066	0,896
70%	0,092	1,355	0,040	1,285	0,097	1,022
80%	0,176	1,488	0,105	1,676	0,163	1,352
90%	0,429	1,678	0,480	2,480	0,433	2,301
95%	1,967	3,975	1,950	3,414	1,962	3,795

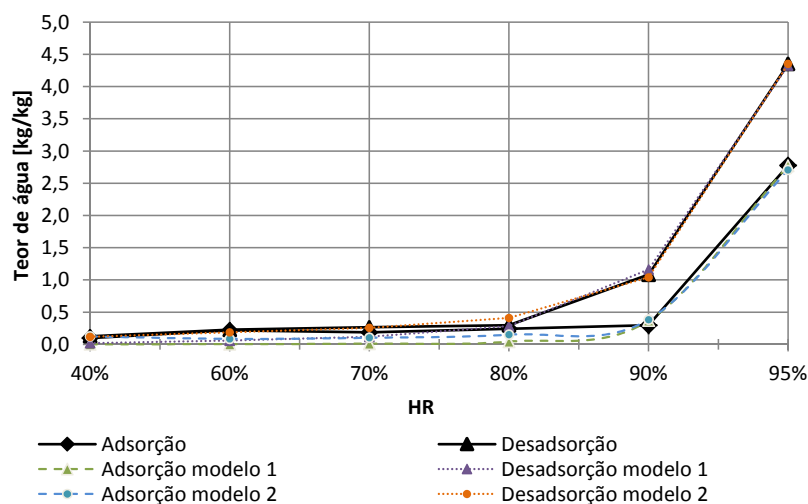


Fig. 5.1: Resultados experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o XPS.

Por simples observação da fig. 5.1 e análise da tab. 5.3 conclui-se que, tanto para adsorção como para a desadsorção, o modelo 2 se adapta melhor às curvas higroscópicas deste material.

Betão celular autoclavado

Apresentam-se na tab. 5.4 e na fig. 5.2 os resultados referentes ao betão celular.

Tab. 5.4: Valores experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o betão celular.

HR	Experimental		Modelo 1		Modelo 2	
	Adsorção	Desadsorção	Adsorção	Desadsorção	Adsorção	Desadsorção
40%	0,333	0,197	0,018	0,015	0,412	0,291
60%	0,581	0,412	0,073	0,066	0,507	0,506
70%	0,766	0,627	0,173	0,165	0,661	0,726
80%	1,154	1,699	0,525	0,546	1,026	1,213
90%	2,512	3,186	2,913	3,630	2,607	3,333
95%	13,462	21,678	13,408	21,638	13,554	21,698

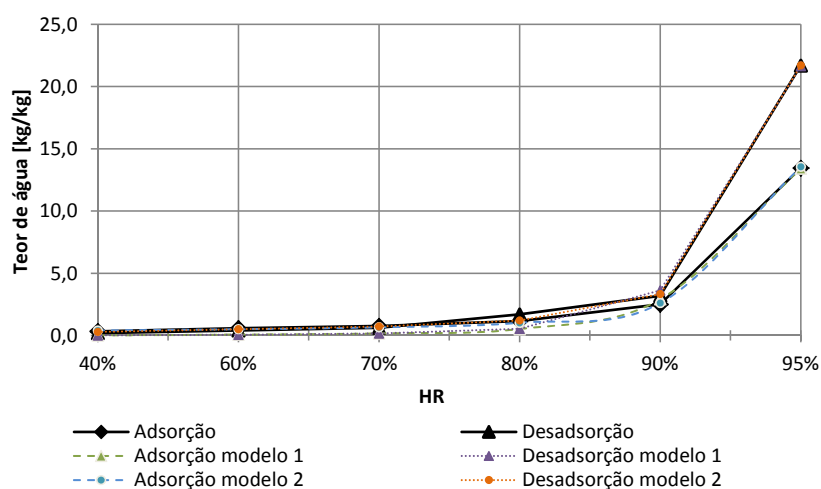


Fig. 5.2: Resultados experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o betão celular.

Numa primeira análise da fig. 5.2 constata-se que ambos os modelos apresentam valores bastante próximos dos reais. No entanto, diminuindo a escala vertical e analisando separadamente os dois processos - adsorção e desadsorção (fig. 5.3) - conclui-se que o modelo 2 traduz com maior precisão o comportamento real de ambos os fenómenos, quando comparado com o modelo 1.

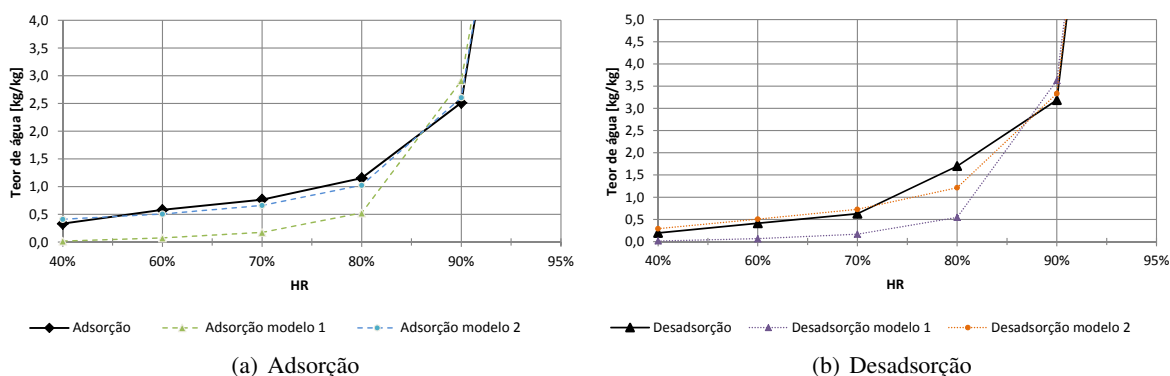


Fig. 5.3: Pormenor da parameterização (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o betão celular.

Tijolo cerâmico furado

Como exemplo do conjunto de materiais cerâmicos da lista, apresentam-se na tab. 5.5 e na fig. 5.4 dados referentes ao tijolo cerâmico furado.

Tab. 5.5: Valores experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o tijolo cerâmico furado.

HR	Experimental		Modelo 1		Modelo 2	
	Adsorção	Desadsorção	Adsorção	Desadsorção	Adsorção	Desadsorção
40%	0,076	0,221	0,010	0,038	0,063	0,181
60%	0,145	0,281	0,037	0,107	0,131	0,284
70%	0,195	0,364	0,080	0,203	0,200	0,393
80%	0,322	0,557	0,218	0,468	0,350	0,630
90%	0,969	1,612	1,051	1,761	0,960	1,573
95%	4,456	6,165	4,427	6,127	4,468	6,166

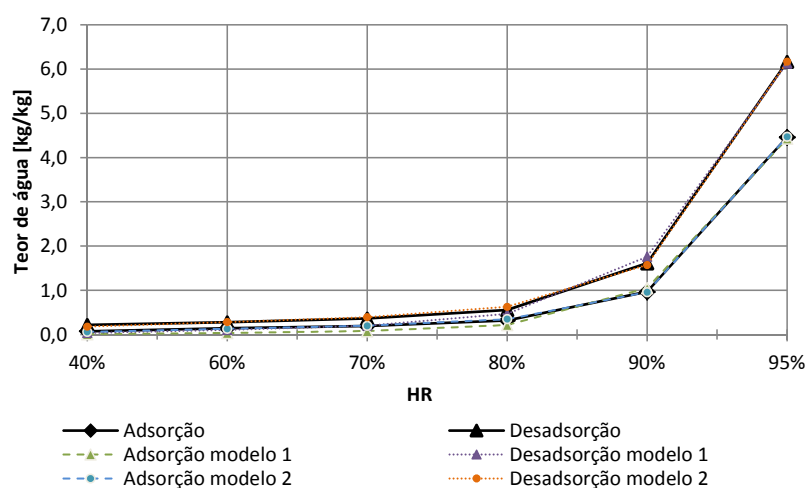


Fig. 5.4: Resultados experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o tijolo cerâmico furado.

Analogamente ao verificado para betão celular, também para o tijolo cerâmico se constata, com base na observação da fig. 5.4, que ambos os modelos apresentam uma aproximação satisfatória do comportamento das duas curvas.

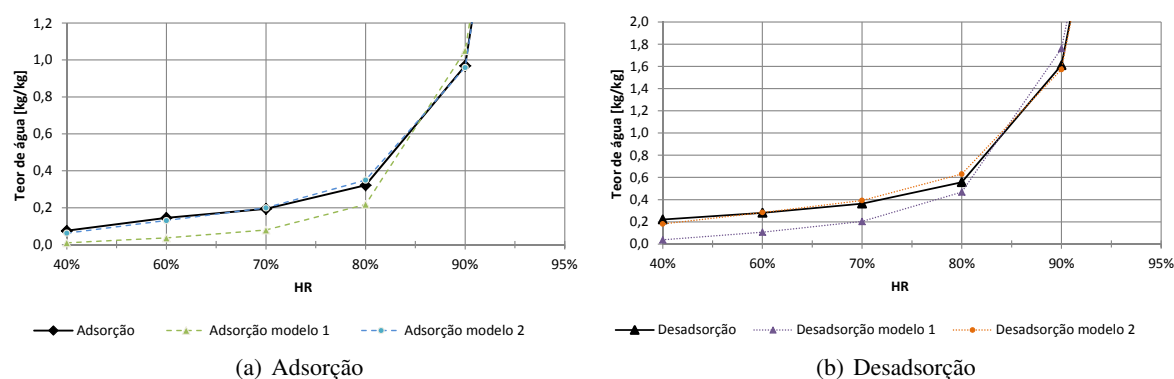


Fig. 5.5: Pormenor da parameterização (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para o tijolo furado.

Analisando em pormenor o comportamento das curvas e os respectivos modelos (fig. 5.5), verifica-se, mais uma vez, que o modelo 2 apresenta melhores resultados do que o modelo 1.

Argamassas

Atendendo ao facto de que todas as argamassas, tanto de cimento como bastardas, em termos da relação entre a curva experimental e os respectivos modelos matemáticos, apresentam um comportamento semelhante optou-se por apresentar na tab. 5.6 e na Figura 5.6 os dados referentes à argamassa A14.

Tab. 5.6: Valores experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para argamassa bastarda A14.

HR	Experimental		Modelo 1		Modelo 2	
	Adsorção	Desadsorção	Adsorção	Desadsorção	Adsorção	Desadsorção
40%	0,042	1,570	0,007	0,968	0,054	1,660
60%	0,089	1,691	0,021	1,503	0,081	1,280
70%	0,113	1,783	0,044	1,868	0,110	1,446
80%	0,195	1,894	0,114	2,341	0,176	1,845
90%	0,439	2,088	0,505	2,973	0,449	2,834
95%	2,024	4,333	2,007	3,377	2,027	4,045

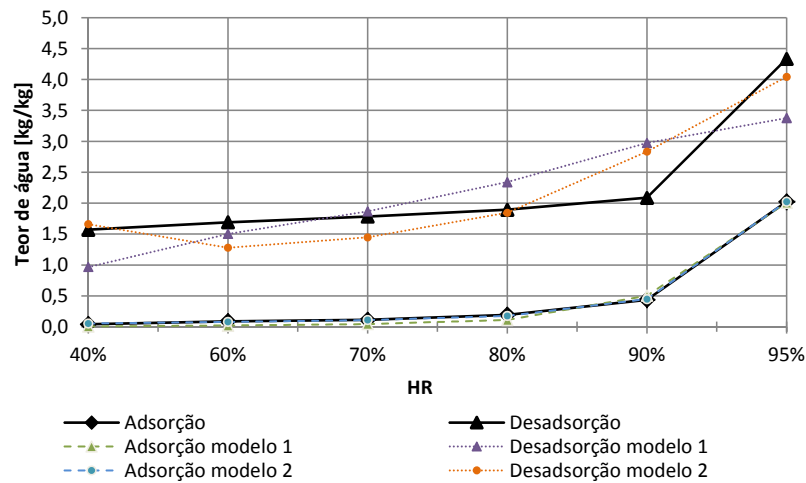


Fig. 5.6: Resultados experimentais e parametrizações (modelos 1 e 2) das curvas higroscópicas para a argamassa bastarda A14.

Da fig. 5.6 verifica-se que para a fase de adsorção ambos os modelos apresentam aproximações satisfatórias, sendo que o modelo 2 recria com maior precisão o comportamento da curva experimental. Para a curva de desadsorção observa-se que nenhum dos modelos é adequado, sendo notórias as diferenças entre ambos os modelos e a curva experimental.

5.1.2 Análise dos resultados dos modelos matemáticos 1 e 2

De um modo geral o modelo 2 apresenta, para todos os materiais, uma melhor aproximação à curva experimental. No caso das argamassas, apesar de em fase de adsorção ambos os modelos apresentarem resultados satisfatórios, na fase de desadsorção constatou-se a inadequabilidade de ambos na tradução do comportamento dos materiais.

5.2 Modelo 3

Dado que, os modelos numéricos anteriormente referidos apresentaram algumas dificuldades na recriação do comportamento higroscópico real da fase de desadsorção de alguns materiais, nomeadamente as argamassas, optou-se neste trabalho pela criação de um modelo que melhor se adaptasse às condições reais para cada um dos materiais. Com recurso ao *software* de regressões não lineares *LABFIT*, foi possível, com base na vasta lista de possíveis funções integradas no programa, foi possível estudar qual a que melhor recria o comportamento higroscópico durante as fases de adsorção e desadsorção entre 40 e 95% de humidade relativa para a gama de materiais analisados neste trabalho.

Com o intuito de obter resultados mais próximos dos reais, optou-se, contrariamente aos modelos anteriores, pela criação de um modelo numérico com 4 parâmetros. Este modelo, identificado como modelo 3, é expresso pela eq. 5.3:

$$W = \frac{A' + \Phi}{B' + C'\Phi^2} + D' \ln(\Phi) \quad (5.3)$$

onde A', B', C' e D' são parâmetros característicos de cada material e W e Φ têm o mesmo significado anteriormente referido.

5.2.1 Parametrização das curvas de cada material

Nas tabelas 5.7 e 5.8 apresentam-se os parâmetros correspondentes a cada um dos materiais para as fases de adsorção e desadsorção, respectivamente. Deve referir-se que, de modo a obter a máxima precisão dos resultados, cada parâmetro deve estar definido até à respectiva quarta casa decimal.

Tab. 5.7: Parâmetros do modelo 3 para a fase de adsorção.

Materiais	Modelo 3			
	A'	B'	C'	D'
Pedra natural	-2,6480E+16	-3,8500E+18	3,9430E+18	-2,7900E-03
Tij. refractário	-3,3540E+08	-6,5720E+10	7,2130E+10	-1,5810E-02
Estuque	-1,0650E+07	-2,4730E+08	2,7100E+08	-3,5940E-02
Tij. furado	-3,7860E-01	4,1990E+00	-4,5100E+00	-8,3550E-02
XPS	-9,6030E-01	-1,7640E+00	1,9510E+00	3,0520E-01
EPS	-9,4840E-01	-1,6550E+00	1,8350E+00	1,6280E-01
Lã - mineral	-9,6200E-01	-5,5490E+00	6,1300E+00	3,9940E-02
Aglom. cort.	3,5630E+06	4,0240E+06	-3,7670E+06	-4,9160E-01
Betão celular	5,3750E+19	1,6770E+20	-1,8130E+20	-1,9760E-02
A1	5,5000E+06	8,2836E+07	-8,9570E+07	-3,1840E-02
A2	2,3000E+07	3,3300E+08	-3,6130E+08	-2,1730E-02
A3	1,9490E+07	2,6410E+08	-2,8660E+08	-1,7070E-02
A4	2,9640E+07	6,1268E+08	-6,6403E+08	-2,2223E-02
A5	4,0274E+06	8,2505E+07	-8,9397E+07	-2,8314E-02
A6	3,1490E+07	6,0640E+08	-6,5740E+08	-7,5940E-03
A7	-2,1700E+11	-5,4120E+12	5,8670E+12	-2,8410E-02
A8	5,3730E+06	1,1810E+08	-1,2770E+08	-1,4150E-02
A9	3,8010E+07	8,2730E+08	-8,9630E+08	-8,0540E-03
A10	3,0824E+07	5,3202E+08	-5,7378E+08	1,9549E-02
A11	2,8470E+07	4,7670E+08	-5,1450E+08	1,0090E-02
A12	1,4865E+07	3,0780E+08	-3,3380E+08	1,4092E-02
A13	5,9860E+07	9,3500E+08	-1,0020E+09	5,9700E-03
A14	1,4240E+07	2,4790E+08	-2,6680E+08	2,2870E-02
A15	1,5400E+07	2,6120E+08	-2,8170E+08	1,8200E-02
A16	-2,2370E+08	-3,8960E+09	4,1780E+09	3,5170E-02
A17	-2,1727E+07	-3,7062E+08	3,9804E+08	2,4688E-02
A18	1,0528E+03	1,8940E+04	-2,0400E+04	4,4410E-02

Tab. 5.8: Parâmetros do modelo 3 para a fase de desadsorção.

Materiais	Modelo 3			
	A	B	C	D
Pedra natural	-5,0616E+00	-1,5364E+02	1,2979E+02	1,4080E-03
Tij. refractário	-1,2601E+00	-7,7996E+00	8,5550E+00	6,9720E+00
Estuque	-	-	-	-
Tij. furado	-8,9200E+10	-4,2950E+07	4,5980E+07	7,7900E-02
XPS	-5,8500E+06	-4,3390E+07	4,6590E+07	4,8400E-02
EPS	-9,8790E-01	-1,8730E+00	2,0680E+00	1,9750E-01
Lã - mineral	-	-	-	-
Aglom. cort.	-9,5900E-01	-1,2660E-01	1,3950E-01	3,6750E+00
Betão celular	9,8390E+17	2,4560E+18	-2,6710E+18	3,1390E-01
A1	-9,4790E-01	-1,3570E-01	1,5090E-01	2,0790E+00
A2	-9,4800E-01	-1,5846E-01	1,7600E-01	1,7673E+00
A3	-9,4901E-01	-1,3676E-01	1,5174E-01	2,0605E+00
A4	-9,4921E-01	-1,5444E-01	1,7138E-01	1,8089E+00
A5	-9,5112E-01	-1,6877E-01	1,8668E-01	1,6759E+00
A6	-9,4976E-01	-1,4977E-01	1,6601E-01	1,8847E+00
A7	-9,5630E-01	-2,1230E-01	2,3300E-01	1,3659E+00
A8	-9,5597E-01	-2,0564E-01	2,2590E-01	1,4051E+00
A9	-9,5190E-01	-2,0506E-01	2,2669E-01	1,4221E+00
A10	-9,6600E-01	-2,0420E-01	2,2170E-01	1,4680E+00
A11	-9,7320E-01	-1,9240E-01	2,0650E-01	1,5910E+00
A12	-9,6340E-01	-1,9200E-01	2,1020E-01	1,5770E+00
A13	-9,7142E-01	-2,7821E-01	3,0211E-01	1,1113E+00
A14	-9,6640E-01	-2,5930E-01	2,8320E-01	1,1888E+00
A15	-9,6400E-01	-2,6700E-01	2,9330E-01	1,1460E+00
A16	-9,7350E-01	-3,0600E-01	3,3210E-01	1,0410E+00
A17	-9,7040E-01	-3,2250E-01	3,5180E-01	9,6790E-01
A18	-9,7090E-01	-3,4260E-01	3,7380E-01	9,2310E-01

De modo a avaliar a qualidade das parametrizações efectuadas com o modelo 3, efectuou-se uma comparação entre os resultados obtidos entre este modelo e o modelo 2. Com este fim, apresentam-se os resultados para o tipo de material que na Secção 5.1.1 apresentou maiores discrepâncias entre os resultados experimentais e os modelos teóricos, a argamassa A14.

Argamassa A14

Na tab. 5.9 e na fig. 5.7 apresentam-se os resultados para as parametrizações de acordo com os modelos 2 e 3 para a Argamassa A14.

Tab. 5.9: Valores experimentais e parametrizações (modelos 2 e 3) das curvas higroscópicas para argamassa bastarda A14.

HR	Experimental		Modelo 2		Modelo 3	
	Adsorção	Desadsorção	Adsorção	Desadsorção	Adsorção	Desadsorção
40%	0,042	1,570	0,054	1,660	0,048	1,558
60%	0,089	1,691	0,081	1,280	0,082	1,721
70%	0,113	1,783	0,110	1,446	0,113	1,786
80%	0,195	1,894	0,176	1,845	0,179	1,867
90%	0,439	2,088	0,449	2,834	0,446	2,095
95%	2,024	4,333	2,027	4,045	2,001	4,357

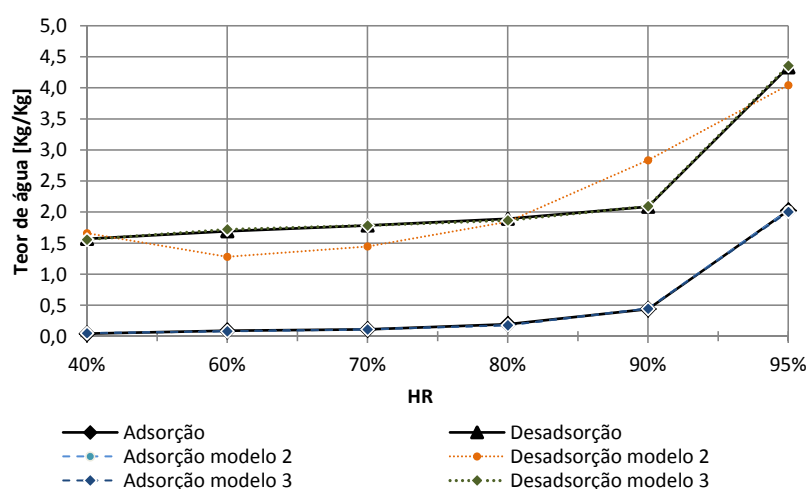


Fig. 5.7: Resultados experimentais e parametrizações (modelos 2 e 3) das curvas higroscópicas para a argamassa bastarda A14.

A análise conjunta da tab. 5.9 e da fig. 5.7 permite concluir que em fase de adsorção os resultados gerados pelo modelo 3 pouco diferem dos do modelo 2, no entanto, para a fase de desadsorção observa-se que o modelo 3 apresenta resultados bastante precisos quando comparados com os valores reais das curvas higroscópicas.

5.2.2 Análise dos resultados dos modelos matemáticos 2 e 3

Analisando os modelos 2 e 3 pode concluir-se que, para a determinação do comportamento higroscópico em fase de adsorção, o modelo 2 não necessitando de tantas casas decimais e utilizando um menor valor de parâmetros quando comparado ao modelo 3, atinge resultados igualmente satisfatórios, pelo que, em fase de adsorção o modelo 2 apresenta-se como o mais adequado. Em fase de desadsorção, como referido na secção 5.1.2, o modelo 2 não apresenta resultados viáveis, sendo o modelo 3 o melhor modelo teórico para recriar o comportamento das argamassas em fase de desadsorção.

Capítulo 6

Patamares histeréticos

Após a finalização do ensaio descrito na Secção 3.2.2, que possibilitou a construção das curvas higroscópicas dos materiais analisados, foi realizado um novo ciclo de desadsorção, porém partindo de um máximo diferente do anteriormente realizado. Para este ensaio optou-se por analisar 3 dos 6 níveis de humidade relativa anteriormente testados, sendo eles, 80% seguido de 60% e posteriormente 40% de humidade relativa. Este processo visa analisar os diferentes comportamentos dos materiais relativamente a teores de água em equilíbrio, quando, em fase de adsorção, são sujeitos a diferentes valores máximos de humidade relativa.

A título de exemplo ilustra-se na fig. 6.1 o fenómeno anteriormente descrito para um material higroscópico genérico. Para tal foram escolhidos, da lista de materiais, alguns que durante o ensaio referido na Secção 3.2.2 apresentaram maiores efeitos histeréticos nos ciclos de adsorção/desadsorção.

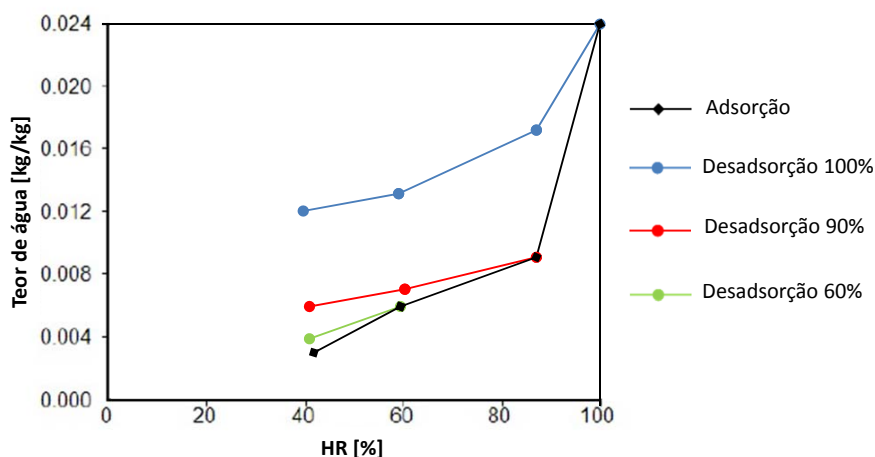


Fig. 6.1: Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção (adaptada de [13]).

Na tab. 6.1 apresentam-se os materiais em que incidiu esta análise.

Tab. 6.1: Lista de materiais analisados para diferentes máximos de teores de água.

Lista de materiais
Pedra natural
Tijolo cerâmico refractário
Tijolo cerâmico furado
Argamassa de cimento - A1
Argamassa bastarda - A14

6.1 Análise de resultados

Durante a análise de resultados deve ter-se em consideração o facto da determinação da segunda curva de desadsorção ter sido realizada após a finalização do ciclo de adsorção desadsorção, a qual demorou vários meses a ser realizada, pelo que se deve ter em conta possíveis variações da massa seca dos provetes no decorrer deste processo. Esta variação de massa pode ter origem em diversos factores, nomeadamente no simples manuseamento das amostras durante as sucessivas pesagens e/ou aquando a submersão dos provetes no início da fase de desadsorção (a 100%). Tal perda de massa dos provetes analisados reflectiu-se numa incoerência do valor do teor de água em equilíbrio no início do segundo processo de desadsorção (80%), que, como se constata da fig. 6.1, deveria ser coincidente com o teor de água em equilíbrio para o mesmo patamar de humidade relativa durante a fase de adsorção.

Apresentam-se nas seguintes figuras os resultados do ensaio para cada um dos materiais enumerados na tab. 6.1.

6.1.1 Pedra natural

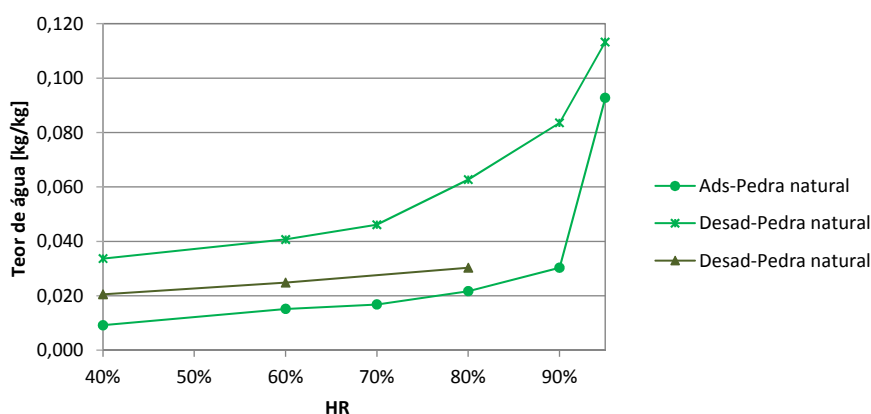


Fig. 6.2: Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção para a pedra natural.

6.1.2 Material cerâmico

Apresentam-se seguidamente os resultados relativos aos materiais cerâmicos, nos quais, de modo a evidenciar o efeito estudado, foi feita uma alteração à escala do eixo das ordenadas.

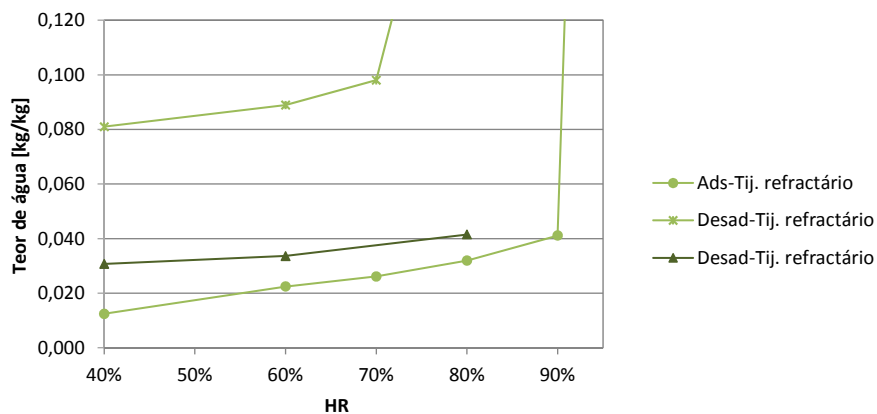


Fig. 6.3: Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção para o tijolo refractário.

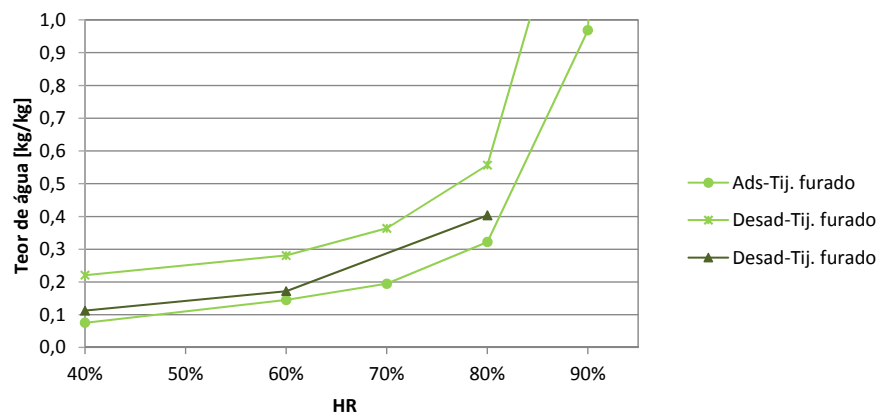


Fig. 6.4: Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção para o tijolo furado.

6.1.3 Argamassas

Devido ao facto de, em geral, todas as argamassas apresentarem um comportamento semelhante, relativamente ao efeito estudado, optou-se pela análise representativa da argamassa A1 para as argamassas de cimento e argamassa A14 para as bastardas.

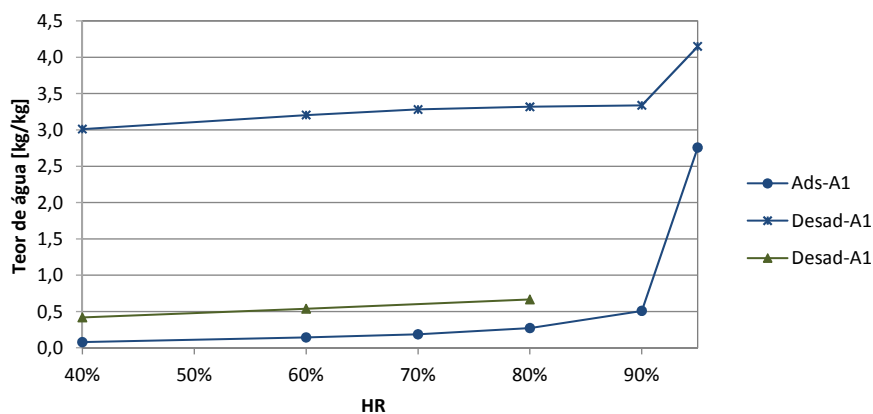


Fig. 6.5: Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção para a argamassa A1.

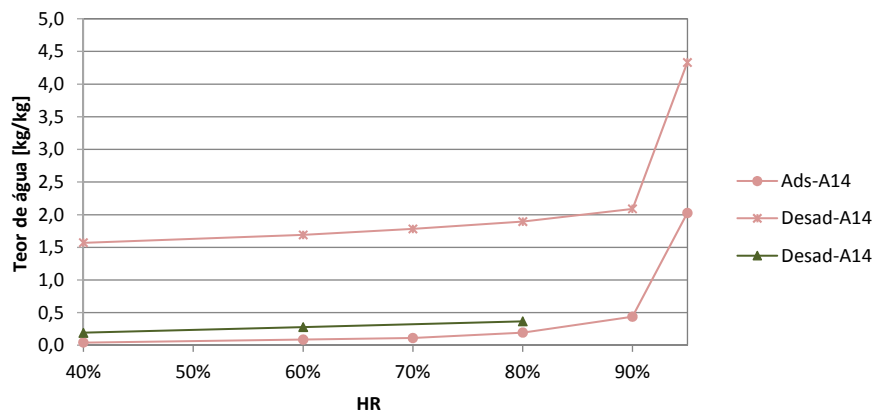


Fig. 6.6: Histerese em função do teor de água máximo atingido durante a fase de adsorção para a argamassa A14.

6.1.4 Discussão de resultados

Por simples observação das figuras anteriores é notória a diferença entre os dois níveis de desadsorção analisados, confirmando-se assim experimentalmente o facto mencionado na Secção 2.1.7, o qual refere que o efeito histerético das curvas higroscópicas é tanto maior quanto maior o valor máximo de teor de água aquando o início do processo de desadsorção.

Capítulo 7

Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros

7.1 Conclusões

A análise dos resultados deste trabalho permite concluir que as variações de humidade relativa induzem variações nos teores de água os quais se reflectem na condutibilidade térmica, sendo este fenómeno mais evidente em materiais com comportamento higroscópico.

Depois de um ciclo de adsorção e desadsorção observou-se o efeito histerético entre os dois processos. Esta histerese apresentou diferenças notórias entre os diferentes tipos de materiais analisados.

A nova abordagem utilizada neste trabalho no tratamento dos dados fornecidos pelo método de porosimetria por intrusão de mercúrio, revelou informação importante relativamente à morfologia dos poros presentes nos materiais estudados. Da relação entre os fenómenos higroscópicos e a informação relativa à estrutura porosa foi possível constatar que, de modo a obter resultados fidedignos, esta análise deve considerar não apenas a distribuição de poros, ou a sua morfologia, mas antes efectuar uma análise conjunta dos dois parâmetros.

No caso particular das argamassas verificou-se que o traço volumétrico desempenha um papel importante no comportamento higroscópico das amostras. Relativamente ao volume de cimento no traço observa-se que, para todas as argamassas estudadas e respectivos patamares de humidade relativa, os teores de água em equilíbrio durante o processo de desadsorção são tanto maiores quanto maior a quantidade de cimento utilizado na amassadura, originando-se, assim, efeitos histeréticos mais evidentes para estas argamassas e consequentes incrementos nos valores de condutibilidade térmica.

A análise da estrutura porosa relativamente ao volume retido, para este grupo de argamassas, corroborou o facto supramencionado, dado que as amostras com maior volume de cimento apresentam maior retenção face às restantes.

No que diz respeito à influência do volume de água nos traços, os resultados apresentam-se inconclusivos, uma vez que, da análise deste parâmetro não foi possível estabelecer uma relação entre esta variável e a posição das curvas higroscópicas das argamassas, tanto bastardas como de cimento. Do mesmo modo, o

estudo da estrutura porosa, relativo à retenção de mercúrio, não revelou nenhuma evolução perceptível com o aumento ou diminuição do volume de água na amassadura.

Em relação aos restantes materiais da lista, é possível observar diferentes comportamentos higroscópicos entre as respectivas amostras.

Da análise dos dados relativos ao grupo de materiais cerâmicos, verifica-se que, tanto em fase de adsorção como na de desadsorção, as curvas higroscópicas correspondentes ao tijolo furado situam-se acima das do tijolo refractário.

Com base na análise dos dados provenientes da porosimetria por intrusão de mercúrio constatou-se, através da análise conjunta da distribuição e morfologia dos poros, que o tijolo refractário apresenta maior retenção de mercúrio quando comparado com o tijolo furado, justificando assim a posição das curvas higroscópicas para os elementos deste grupo.

A análise dos resultados relativos à condutibilidade térmica revela uma inconsistência quando se relaciona com a informação dada pelas posições das curvas higroscópicas dos dois materiais, uma vez que o tijolo refractário apresenta valores notoriamente inferiores aos do tijolo furado. Como mencionado anteriormente, este facto poderá ter como causa o incumprimento da espessura mínima da amostra estipulada pelo ISOMET de modo a serem obtidos valores coerentes.

Relativamente ao estuque, apesar de apenas ser apresentada a fase de adsorção, é possível observar uma particularidade interessante na distribuição de poros deste material, que consiste no facto de apenas existirem poros entre a gama de 1 e 10 μm , gama essa que apresenta uma elevada retenção.

Para o caso do betão celular autoclavado verifica-se que, de toda a lista, é o material que apresenta valores mais elevados de teores de água em equilíbrio. No entanto, devido às características da estrutura porosa, constata-se uma retenção de mercúrio inferior aos restantes materiais. Esta informação permite justificar o baixo efeito histerético presente nesta amostra.

Tendo como base a análise dos valores do teor de água em equilíbrio da amostra, a condutibilidade térmica do betão celular apresenta valores mais baixos do que seria expectável. Esta ocorrência pode ser justificada com base na elevada porometria deste material, a qual promove uma secagem mais rápida da amostra.

Da análise dos dados para a amostra de pedra natural, verifica-se que apesar do efeito histerético entre as fases de adsorção e desadsorção ser bastante pequeno, este material apresenta valores de condutibilidade térmica consideravelmente elevados, apresentando diferenças significativas entre as duas fases.

No caso do grupo de isolantes testado, verifica-se que para o XPS e para o EPS ambos apresentam variações bastante baixas de teor de água em equilíbrio no regime higroscópico, facto que se reflecte no comportamento térmico deste tipo de materiais. Para os restantes isolantes, consta-se que a lã mineral apresenta uma curva higroscópica na fase de adsorção inferior à do aglomerado de cortiça. No entanto, analisando a condutibilidade térmica de cada um dos materiais, constata-se que a lã mineral, apesar de apresentar menores valores de teores de água em equilíbrio, apresenta valores superiores de condutibilidade térmica. Esta ocorrência pode ser justificada pelo facto da lã mineral apresentar valores de porosidade fechada bastante próximos de zero.

Com base nos resultados obtidos observa-se, para todos os materiais, a ocorrência de variações de condutibilidade térmica consideráveis, pelo que, tendo como base a afirmação mencionada na Secção 2.3, a qual refere o facto desta grandeza ser determinada em condições padronizadas de 23 °C e 50% de humidade relativa, é possível concluir que o método de Glaser poderá não prever o comportamento real de uma dada solução construtiva, pelo que é de extrema importância o estudo de fenómenos higroscópicos nos materiais de construção.

Outro factor importante, que é usualmente descartado na caracterização dos materiais em termos de condutibilidade, é o efeito histerético. Neste trabalho foi comprovado experimentalmente que negligenciar o efeito histerético entre as fases de adsorção e desadsorção poderá ter como consequências, não só valores de condutibilidade térmica adulterados, como também erros consideráveis no controlo e proliferação de fungos e outras anomalias comumente presentes nas soluções construtivas.

7.2 Desenvolvimentos futuros

7.2.1 Determinação das curvas higroscópicas

Em futuros desenvolvimentos propõe-se o estudo da influência da área exposta dos provetes nos fenómenos de adsorção e desadsorção, de modo a estabelecer condições idênticas para todos os provetes. Todos os provetes deverão ser colocados sobre um recipiente para evitar erros por perda de massa originadas pelo manuseamento do material e sujeitar o mesmo número de faces do provete às condições higrotérmicas estipuladas no interior da câmara climática.

7.2.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Como desenvolvimentos futuros sugere-se, em termos da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, a manipulação dos patamares de registo dos ciclos de intrusão e extrusão. Esta medida visa não só estipular os mesmos valores de pressão registados durante os dois ciclos, como também aumentar a amplitude de pressões analisadas durante a fase de extrusão. Estas acções permitirão uma análise mais correcta em termos de volume retido e permitirão ainda a análise da influência da estrutura macroporosa na determinação desta grandeza.

Para a tentar eliminar dos gráficos as fases de extrusões excessivas propõe-se uma análise com vários ciclos de intrusão extrusão.

De modo a analisar a viabilidade deste procedimento terão de ser elaborados previamente estudos sobre a influência de múltiplos ciclos de intrusão-extrusão na estrutura porosa dos materiais. Caso os resultados se apresentem satisfatórios, o método proposto poderá então ser considerado. Este método consiste, numa primeira fase, na determinação das zonas onde ocorre extrusão excessiva; seguidamente com base nesta informação, devem ser estabelecidos ciclos intrusão-extrusão tendo como máximos o valor do diâmetro máximo imediatamente anterior à extrusão excessiva. Posteriormente deve dar-se início a uma nova fase de intrusão tendo como início o valor máximo do ciclo anterior. Este artifício tem como objectivo, caso se verifique a sua viabilidade, a determinação qualitativa e quantitativa do volume de mercúrio retido em cada diâmetro.

Bibliografia

- [1] American Society for Testing and Materials (ASTM) - C 1498:04 - *Standard test method for hygroscopic sorption isotherms of building materials*, ASTM, 2004.
- [2] CANTRELL, K. *et al.* - *Applicability of the Linear Sorption Isotherm Model to Represent Contaminant Transport Processes in Site-Wide Performance Assessments*. Relatório técnico, 2002.
- [3] COLLET, F. *et al.* - *Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials*. Construction and Building Materials, Volume 22, n° 6, págs. 1271 - 1280. 2008.
- [4] CORREIA, J.; HENRIQUES, F. - *Efeitos da humidade higroscópica no comportamento térmico dos materiais*. Construção magazine, n° 54, págs. 10 - 14, Lisboa, 2013.
- [5] DELL'ISOLA, M. *et al.* - *Experimental Analysis of Thermal Conductivity for Building Materials Depending on Moisture Content*. International Journal of Thermophysics, Volume 33, págs. 1674-1685. Springer US, 2012.
- [6] EMID, S.; CREYGHTON, J. - *High resolution NMR imaging in solids*. Physica B+C, Volume 128, n° 1, págs. 81 - 83. 1985
- [7] FREITAS, V. - *Humidade Ascensional*. Porto, FEUP, 2008.
- [8] GALLÉ, C. - *Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying*. Cement and Concrete Research, Volume 31, n° 10, págs. 1467 - 1477. 2001.
- [9] GREGG, S.; SING, K. - *Adsorption, surface area, and porosity*. Academic Press, 1991.
- [10] HAGENTOFT, C. - *Introduction to Building Physics*. Lightning Source, 2001.
- [11] HANSEN, K. - *Sorption isotherms: A catalogue*. Relatório técnico. The Technical University of Denmark, Lynby, 1986.
- [12] HELTON, S. *et al.* - *Obtenção de pellets por extrusão e esferonização farmacêutica. Parte II. Avaliação das características físicas de pellets*. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, Volume 42, págs. 309 - 318. Scielo, 2006.
- [13] HENRIQUES, F. - *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. Lisboa, UNL - FCT, 2011.
- [14] HENRIQUES, F. - *Humidade em paredes*. Lisboa, LNEC, 2007.
- [15] HENS, H. - *Applied building physics*. Ernst & Sohn, 2010.

- [16] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) - ISO 9346 - *Hygrothermal performance of building materials and products - Physical and quantities for mass transfer - vocabulary* Geneva, ISO 2007.
- [17] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) - ISO 12571 - *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties*. Geneva, ISO 2007.
- [18] ISOMET 2104 - Guia do utilizador. Disponível em <http://www.appliedp.com/en/isomet.htm>. Acesso em 2013.
- [19] KORONTHALYOVA, O. - *Moisture storage capacity and microstructure of ceramic brick and autoclaved aerated concrete*. Construction and Building Materials, Volume 25, n° 2, págs. 879 - 885. 2011.
- [20] KRUS, M. *et al.* - *Determination of the moisture storage characteristics of porous capillary active materials*. Materials and Structures, Volume 31, n° 31, págs. 522-529. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [21] MICROMERITICS Site. Disponível em <http://www.micromeritics.com/>. Acesso em 2012.
- [22] MICROMERITICS Site. Disponível em <http://www.micromeritics.com/Product-Showcase/AutoPore-IV.aspx>. Acesso em 2012.
- [23] MORISHIGE, K; TATEISHI, N. - *Adsorption hysteresis in ink-bottle pore*. The Journal of Chemical Physics, Volume 110, n° 4, págs. 2301-2306. AIP, 2003.
- [24] MORSE, A.; ACKER, P. - *Indoor Air Quality and Mold Prevention of the Building Envelope*. Washington, Whole building design guide, 12-01-2009. [http : //www.wbdg.org/resources/env_aq.php?r = envelope](http://www.wbdg.org/resources/env_aq.php?r=envelope). Acesso 2013.
- [25] OLIVER, A.; *et al.* - *Dampness in Buildings*. Edimburgo, Blackwell Science, 1997.
- [26] OUOBA, S. *et al.* - *A New Experimental Method to Determine the Sorption Isotherm of a Liquid in a Porous Medium*. Environmental Science & Technology, Volume 44, n° 15, págs. 5914-5919. 2010.
- [27] PAGE, J. *et al.* - *Pore-space correlations in capillary condensation in Vycor*. Physical review letters, Volume 71, n° 8, págs. 1217-1219, 1993.
- [28] PAMELA, F. *et al.* - *Drying effect on cement paste porosity at early age observed by NMR methods*. Construction and Building Materials, Volume 29, págs. 496 - 503. 2012.
- [29] PAVLÍK, Z. *et al.* - *Water Vapor Adsorption in Porous Building Materials: Experimental Measurement and Theoretical Analysis*. Transport in Porous Media, Volume 91, págs. 939-954. Springer Netherlands, 2012.
- [30] PEUHKURI, R *et al.* - *Effect of method, step size and drying temperature on sorption isotherms. in 7th Nordic Symposium on Building Physics*. Reykjavik, 2006.
- [31] QUANTACHROME instruments, Apresentação do equipamento - *Caraterização de sólidos porosos: Porosimetria de Hg & Porometria*. 2011.

-
- [32] RAMOS, N. - "*A importância da inércia higroscópica no comportamento higrotérmico dos edifícios*". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Porto, FEUP, 2007.
- [33] RATO, V. - "*Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Caparica, FCT-UNL, 2006.
- [34] RAVIKOVITCH, P.; NEIMARK, A. - *Experimental Confirmation of Different Mechanisms of Evaporation from Ink-Bottle Type Pores: Equilibrium, Pore Blocking, and Cavitation*. Langmuir, Volume 18, n° 25, págs. 9830-9837. 2002.
- [35] RUSSEL, A. - *Condensation in buildings*. Australian Building Codes Board, Canberra, 2011.
- [36] SANTOS, C.; MATIAS, L. - *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolturas dos Edifícios*. - ITE50. Lisboa, LNEC, 2007.
- [37] SANTOS, N. - "*Aplicação de Técnicas na Avaliação de Papéis Revestidos com Diferentes Pigmentos Minerais*". Tese de Doutoramento em Geociências, Aveiro, Universidade de Aveiro, 2009.
- [38] SLANINA, P. - "*Moisture transport in compact flat roof*". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Praga, Czech Technical University in Prague - Faculty of Civil Engineering, 2009.
- [39] STRAUBE, J. - *Moisture and Materials*. Building Science Digest, Volume 138, 2006 .
- [40] TEGERNSEE, K. - "*Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Estugarda, Von der Fakultät Bauingenieur - und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, 2001.
- [41] UNL/DEC - Fichas de Ensaio - *Pedras naturais e artificiais. Determinação da massa volúmica*. Caparica, FCT/UNL, 1996. Fe 2.
- [42] UNL/DEC - Fichas de Ensaio - *Pedras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta*. Caparica, FCT/UNL, 1996. Fe 1.
- [43] WEBB, P. *et al.* - *Analytical methods in fine particle technology*. Micromeritics Instrument Corporation, 1997.
- [44] WORLD HEALTH ORGANIZATION - *Who Guidelines for Indoor Air Quality: Dampness and Mould*. Copenhagen, World Health Organization Europe, 2009.

Anexo A

Resultados - Influência da dosagem de cimento

A.1 Argamassas de cimento

A.1.1 Grupo 2

Curvas higrscópicas

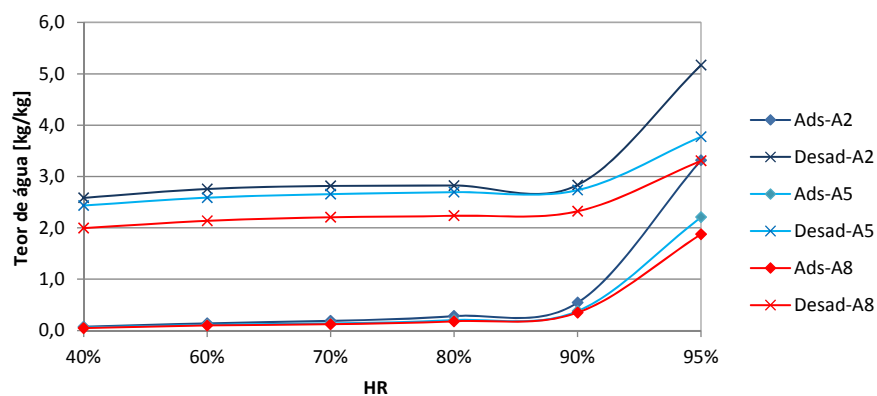


Fig. A.1: Curvas higrscópicas correspondentes às argamassas do grupo 2.

Informação sobre a estrutura porosa

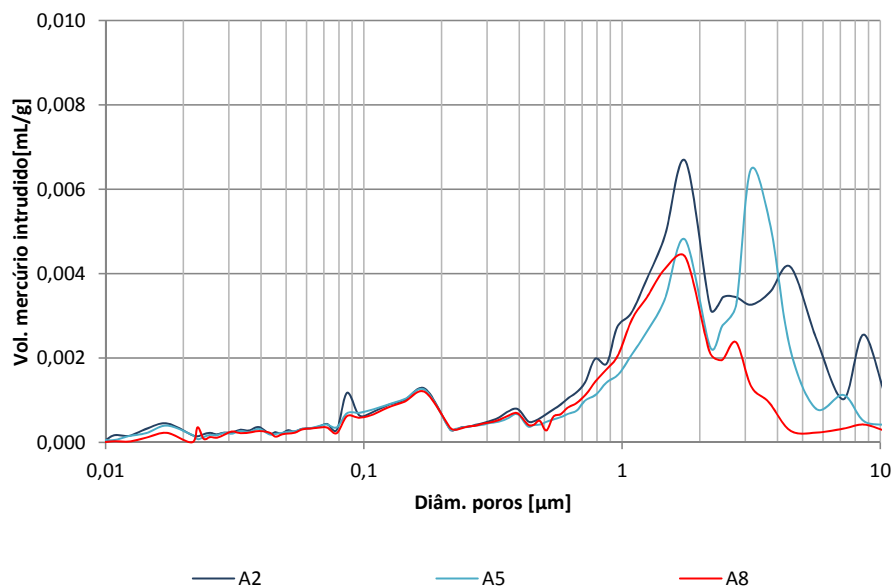
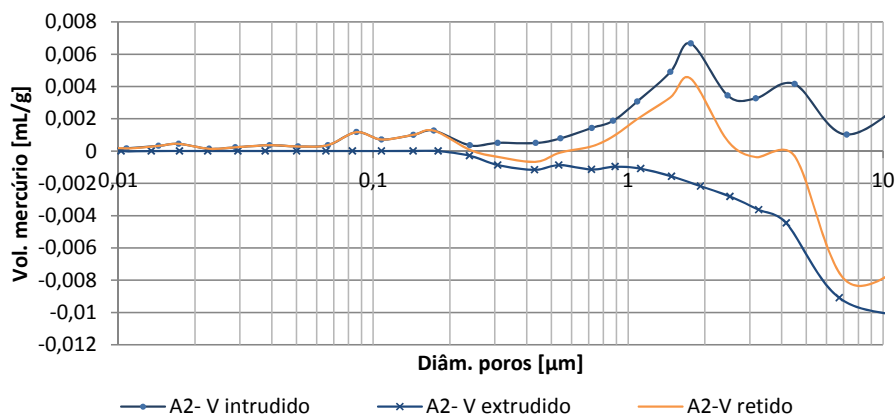
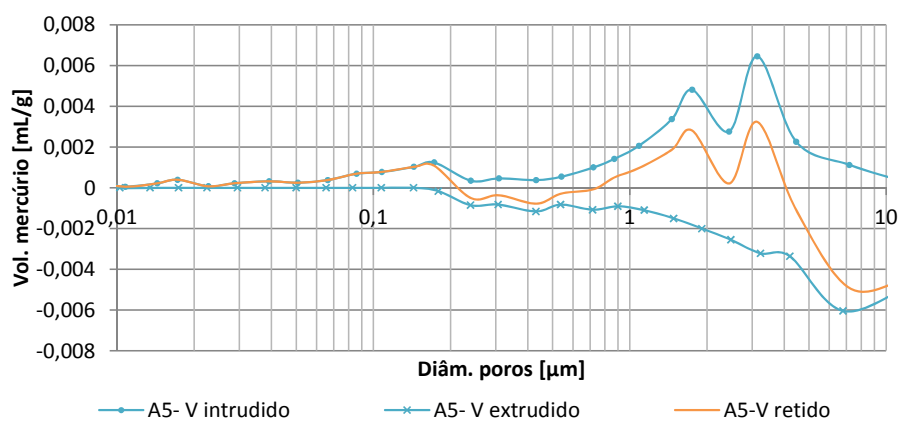


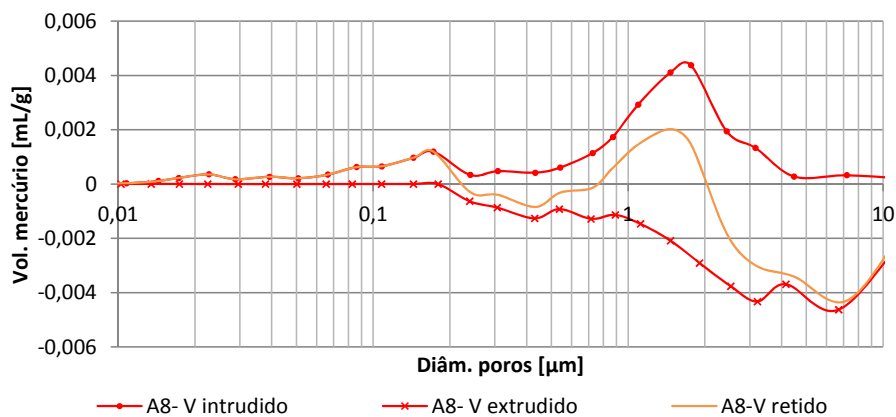
Fig. A.2: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do grupo 2.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A2.

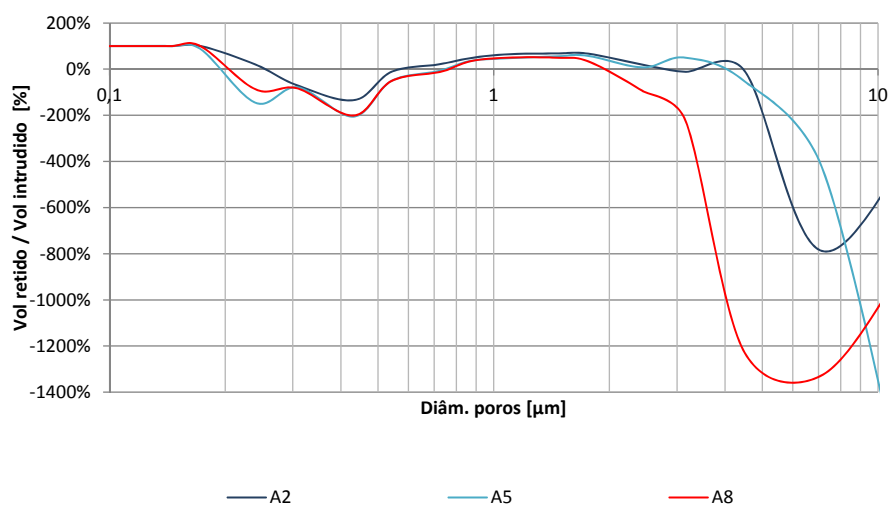


(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A5.

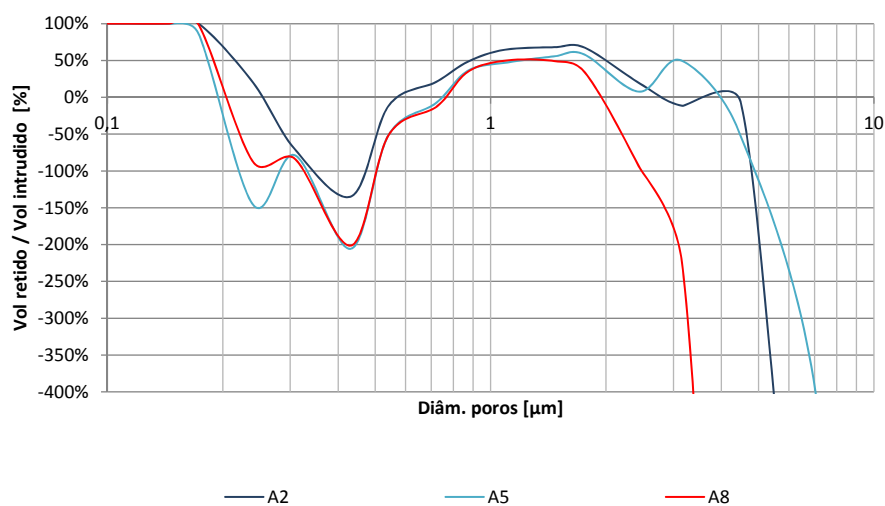


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A8.

Fig. A.3: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo 2.



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido .

Fig. A.4: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do grupo 2.

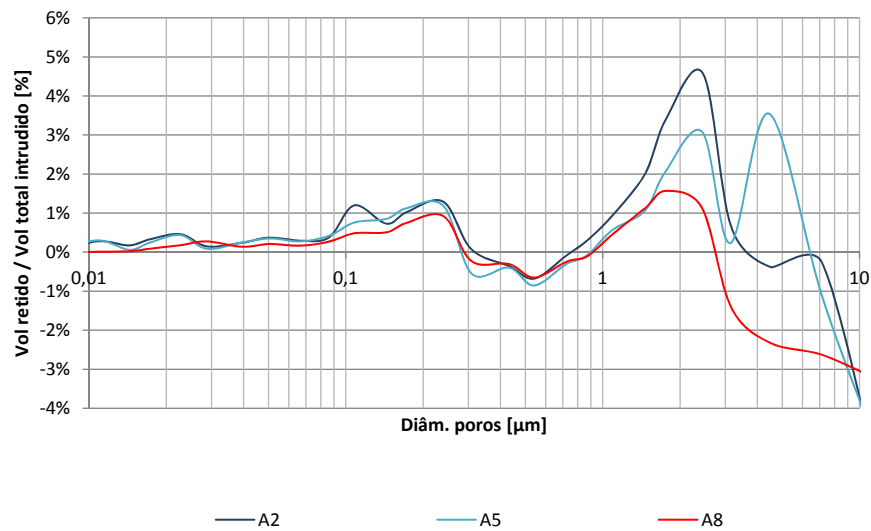
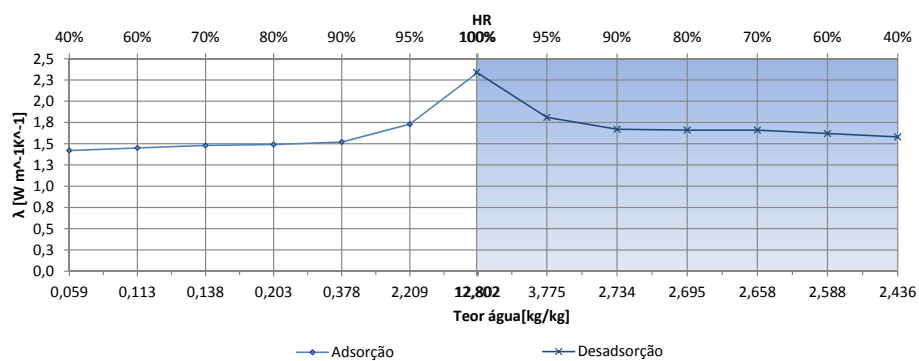
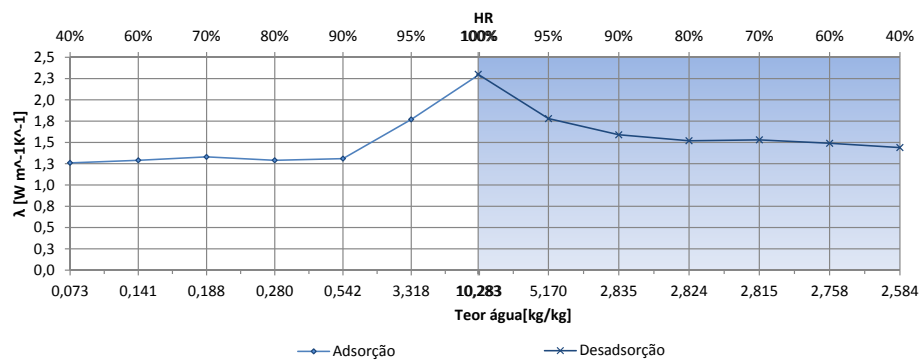


Fig. A.5: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do grupo 2.

Condutibilidade térmica



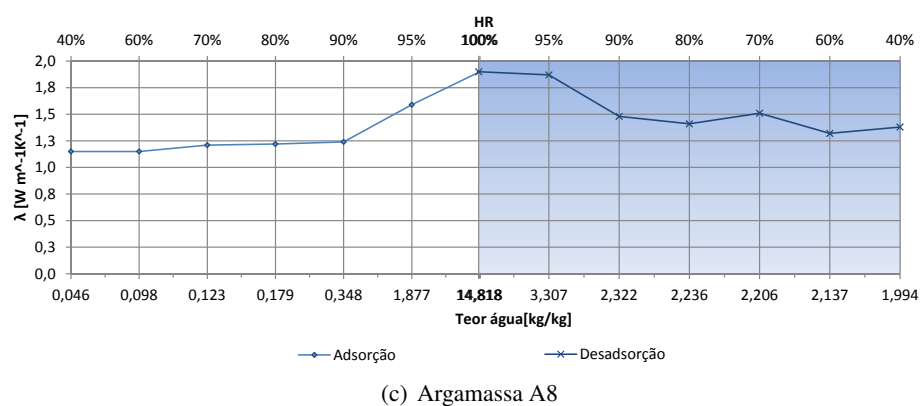


Fig. A.6: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do grupo 2.

A.1.2 Grupo 3

Curvas higrscópicas

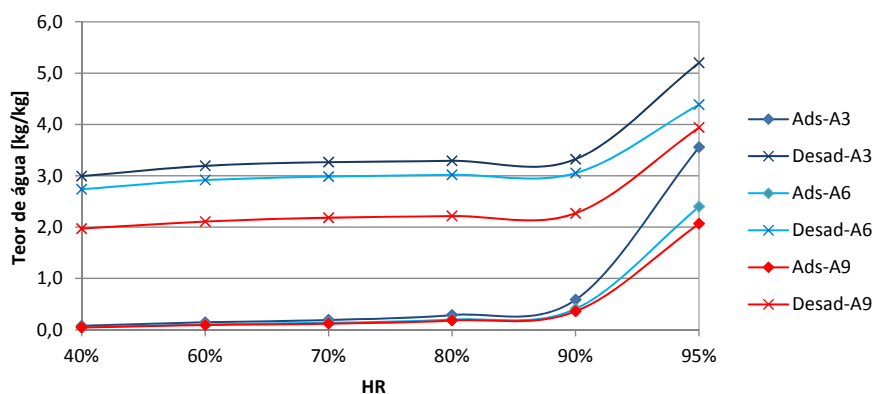


Fig. A.7: Curvas higrscópicas correspondentes às argamassas do grupo 3.

Informação sobre a estrutura porosa

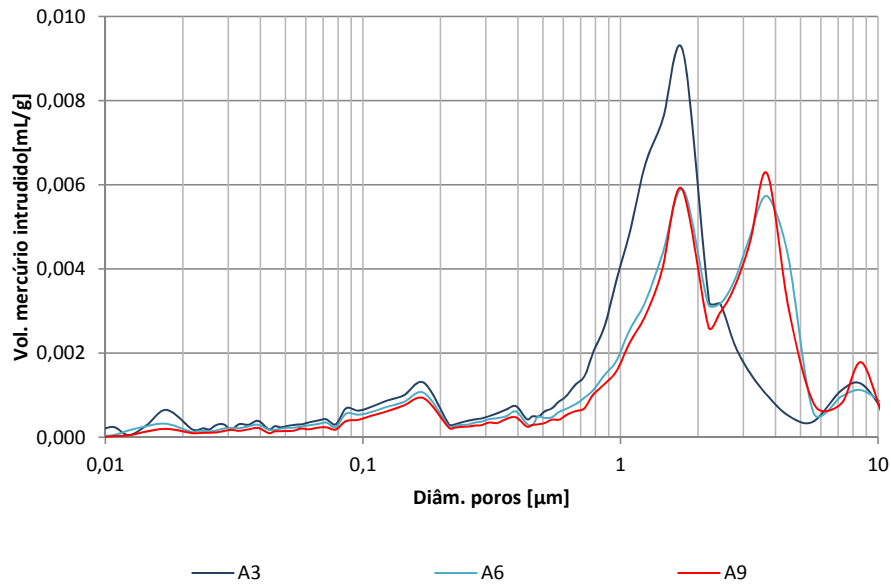
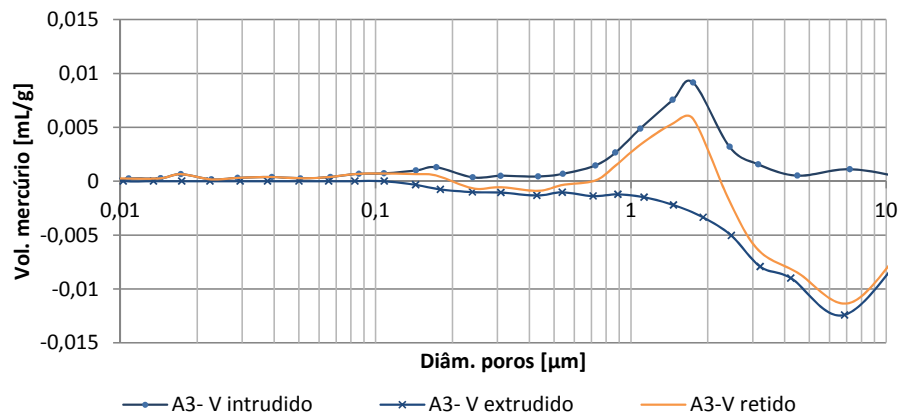
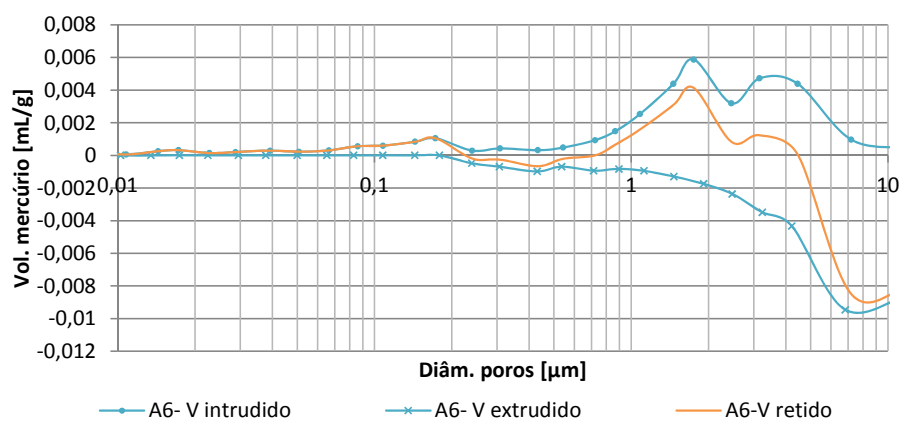


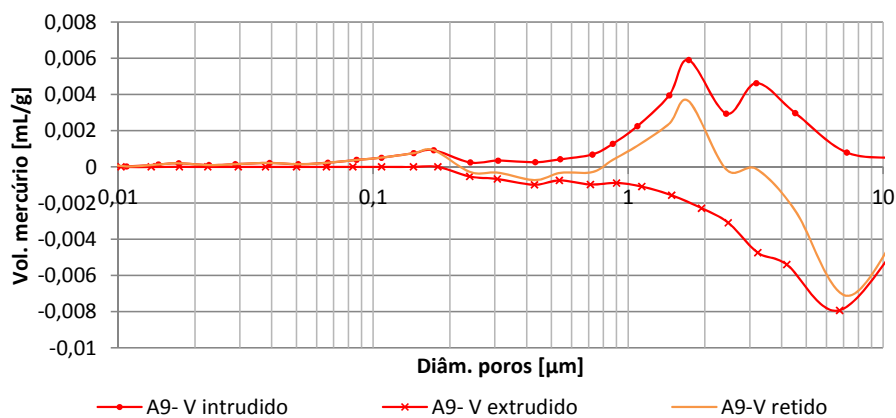
Fig. A.8: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do grupo 3.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A3.

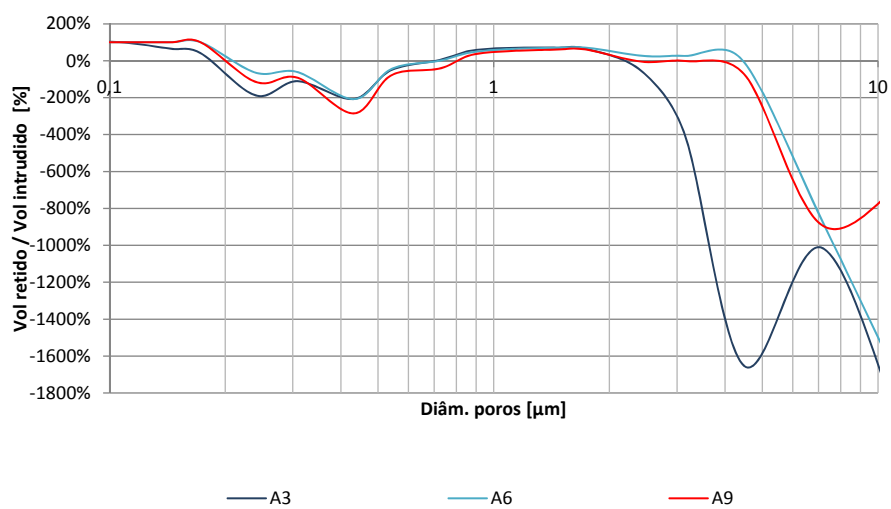


(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A6.

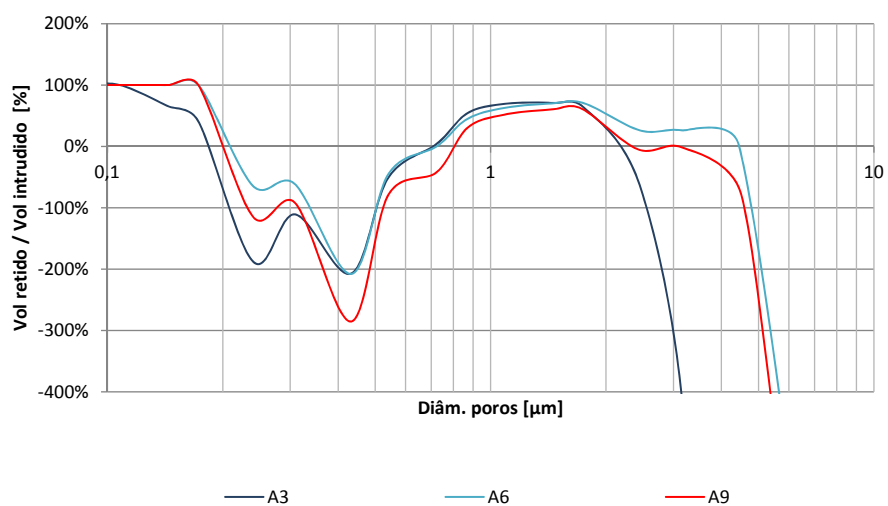


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A9.

Fig. A.9: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo 3.



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido .

Fig. A.10: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do grupo 3.

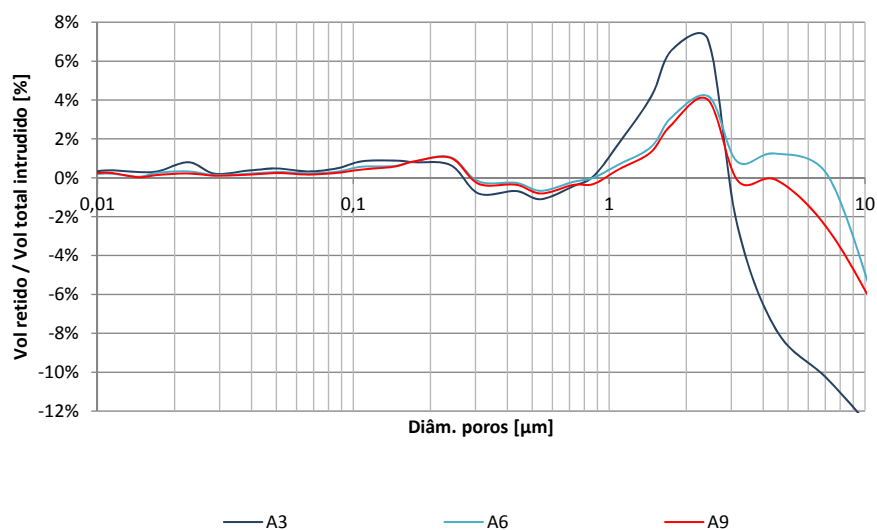
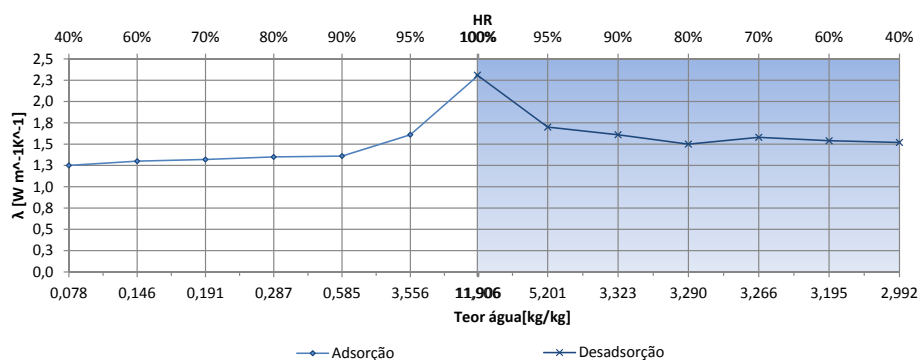
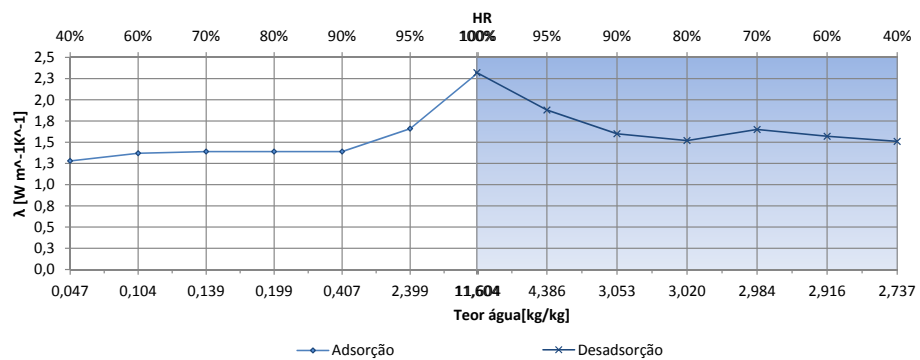


Fig. A.11: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do grupo 3.

Condutibilidade térmica



(a) Argamassa A3



(b) Argamassa A6

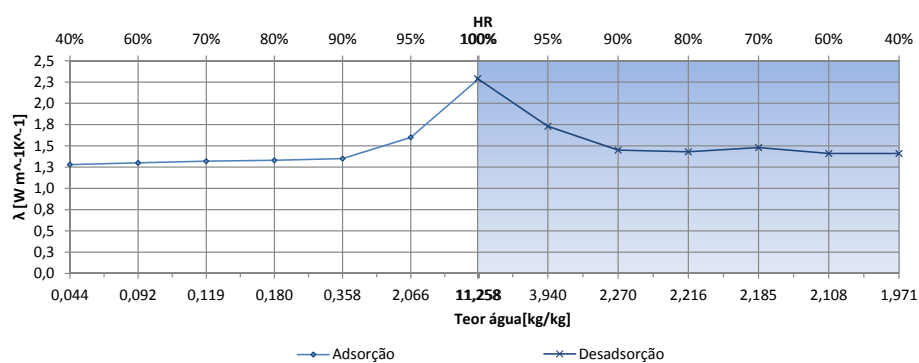


Fig. A.12: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do grupo 3.

A.2 Argamassas bastardas

A.2.1 Grupo 5

Curvas higrscópicas

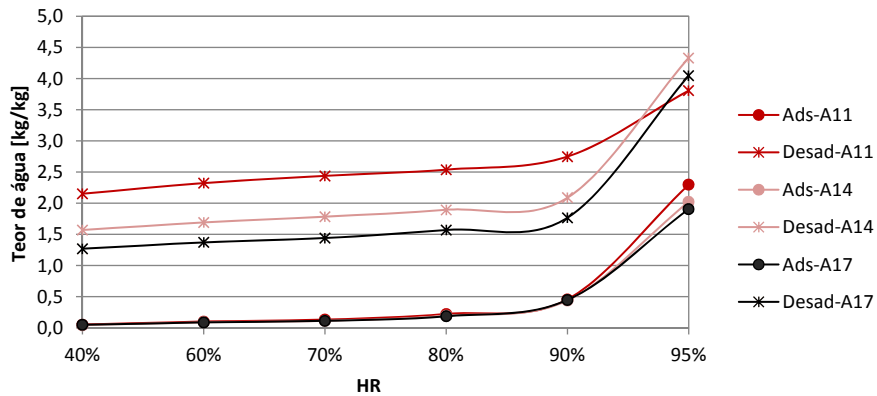


Fig. A.13: Curvas higrscópicas correspondentes às argamassas do grupo 5.

Informação sobre a estrutura porosa

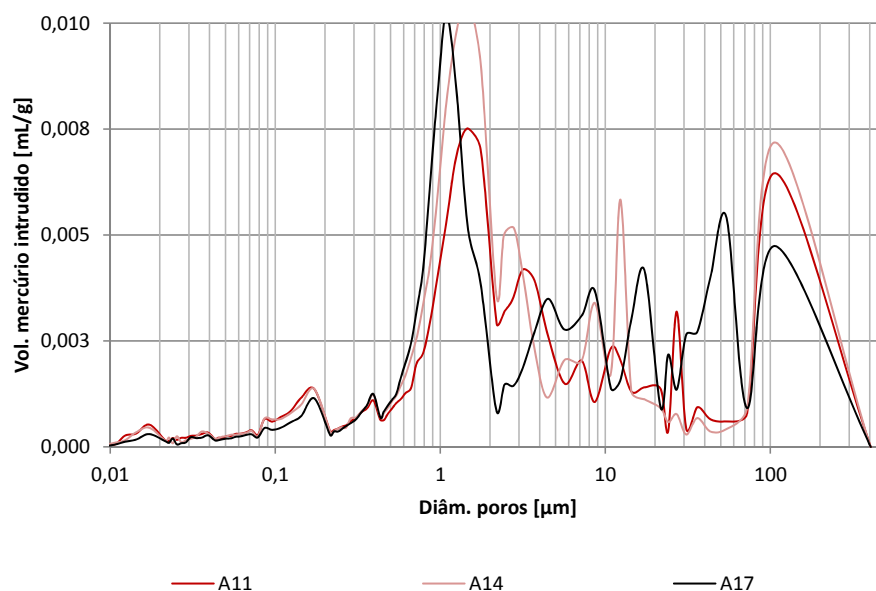
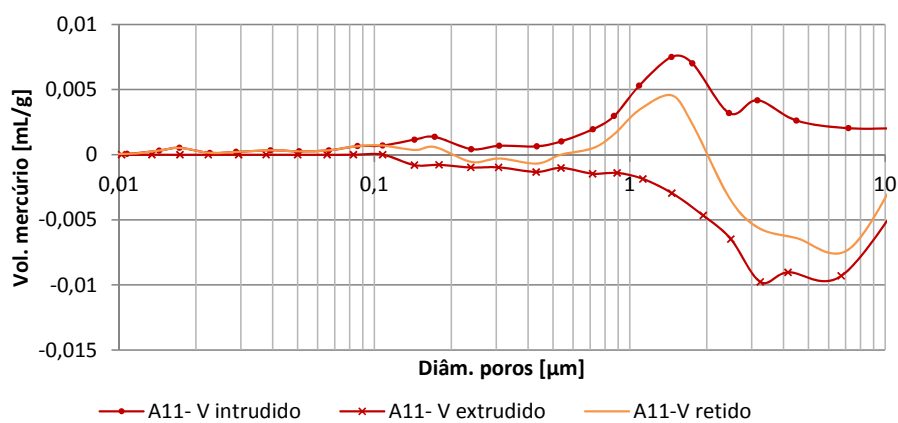
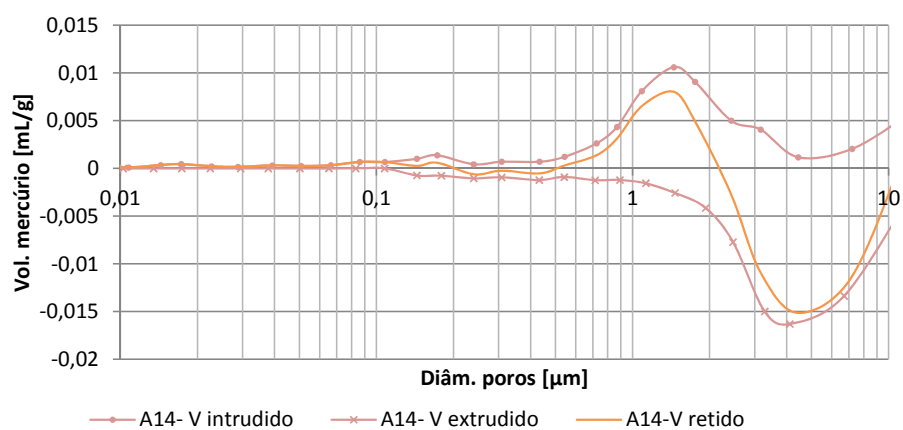


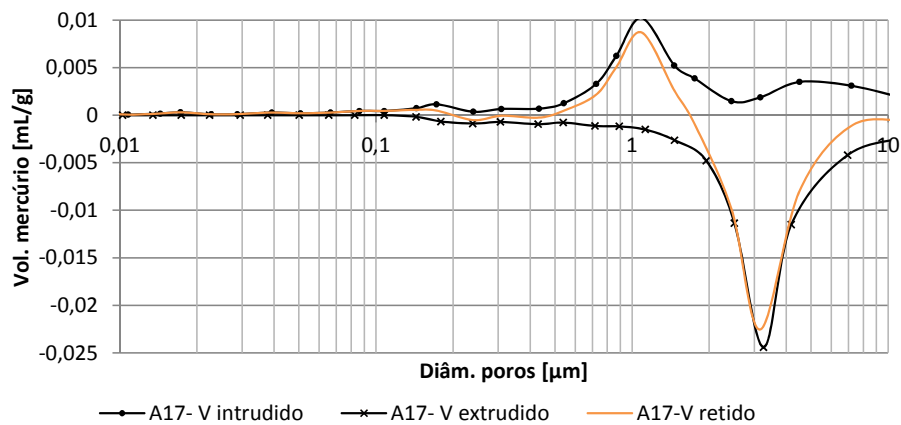
Fig. A.14: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do grupo 5.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A11.

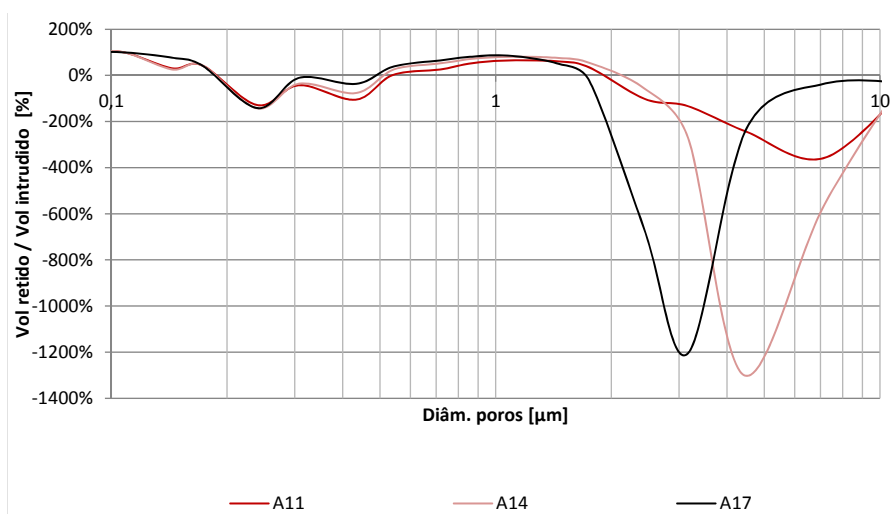


(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A14.

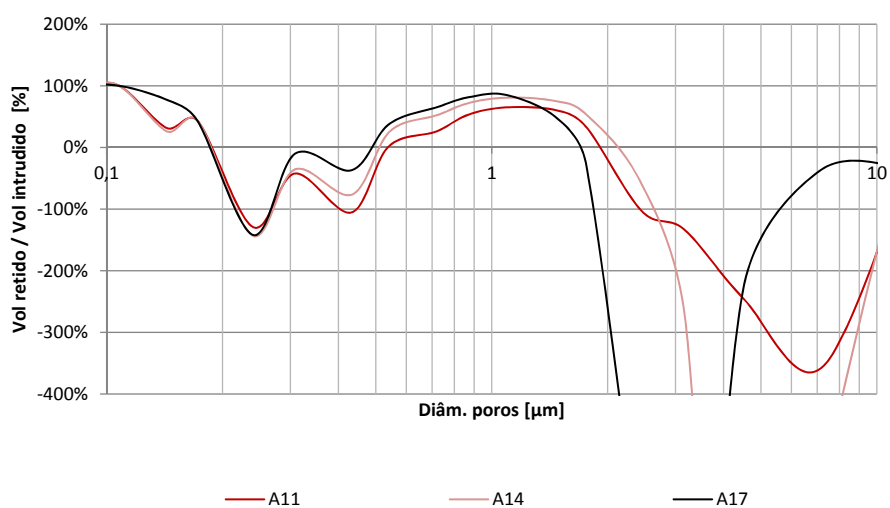


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A17.

Fig. A.15: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo 5.



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido .

Fig. A.16: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas bastardas do grupo 5.

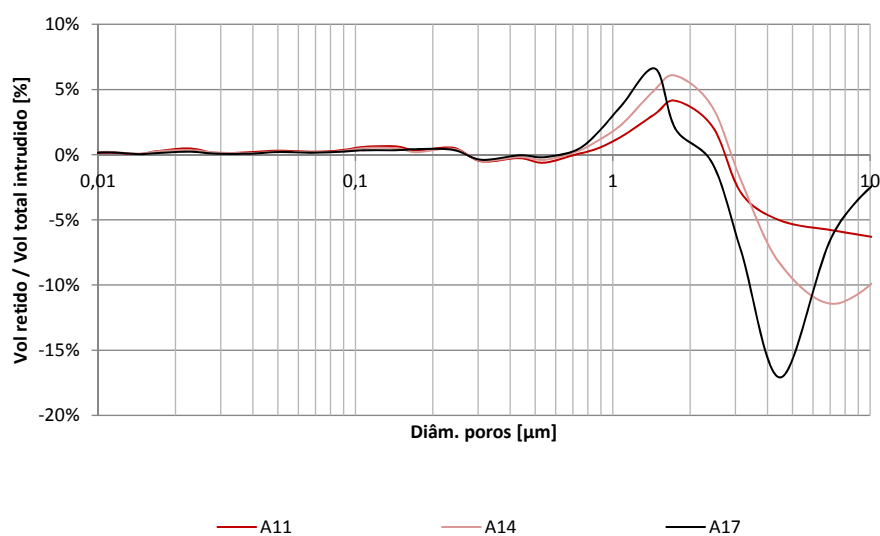
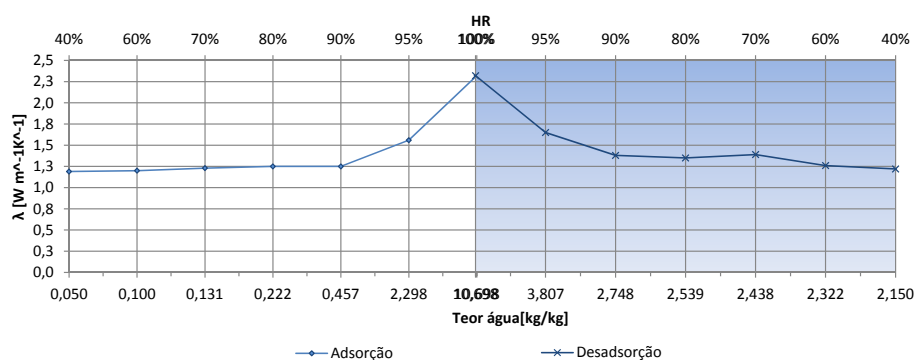
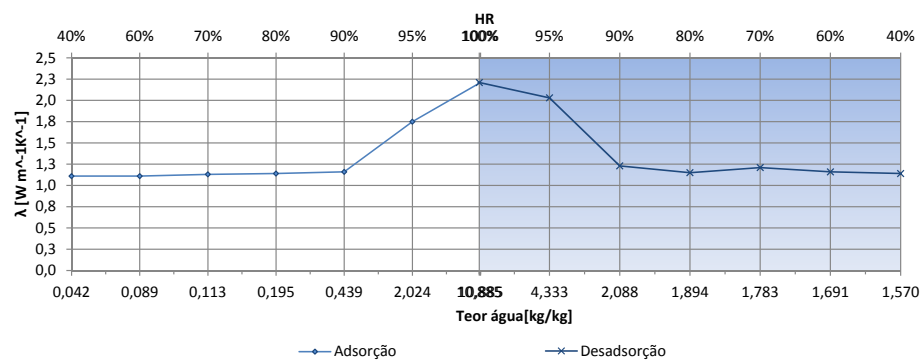


Fig. A.17: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas bastardas do grupo 5.

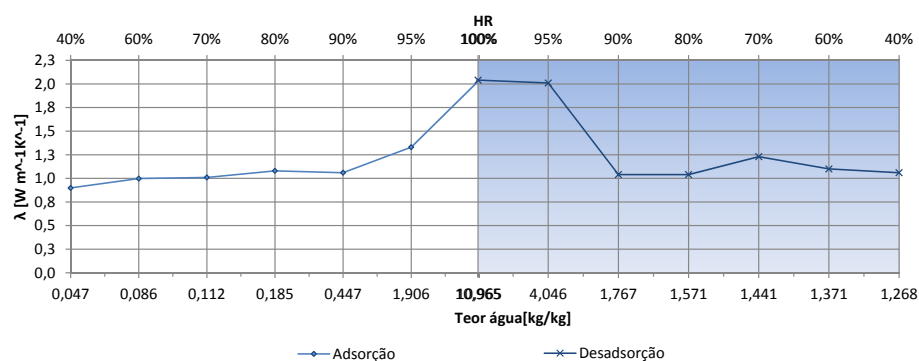
Condutibilidade térmica



(a) Argamassa A11



(b) Argamassa A14



(c) Argamassa A17

Fig. A.18: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas bastardas do grupo 5.

A.2.2 Grupo 6

Curvas higrscópicas

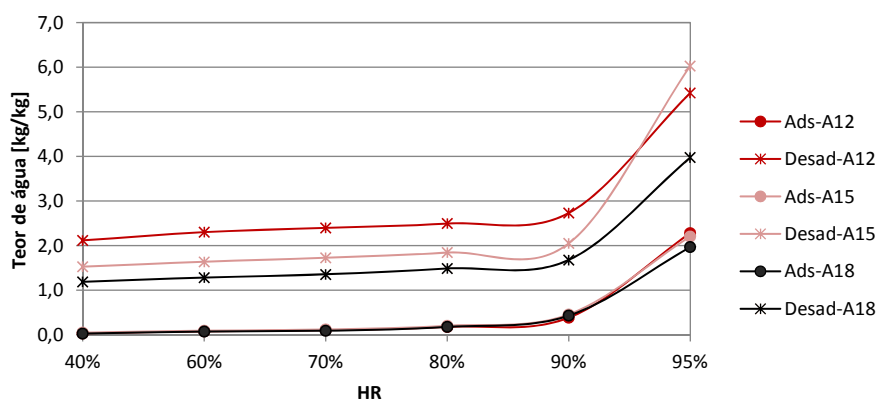


Fig. A.19: Curvas higrscópicas correspondentes às argamassas do grupo 6.

Informação sobre a estrutura porosa

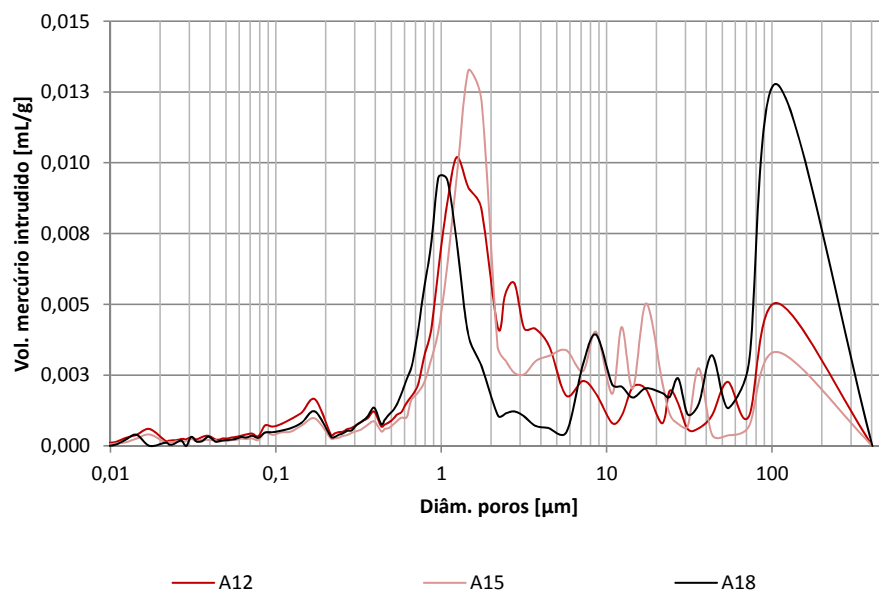
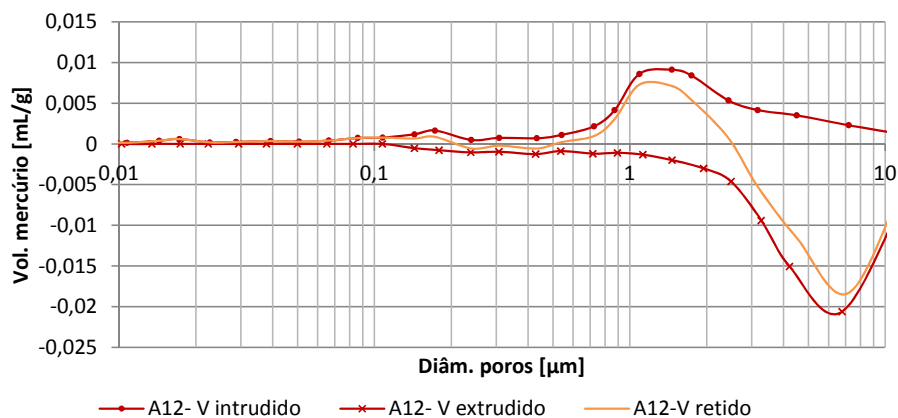
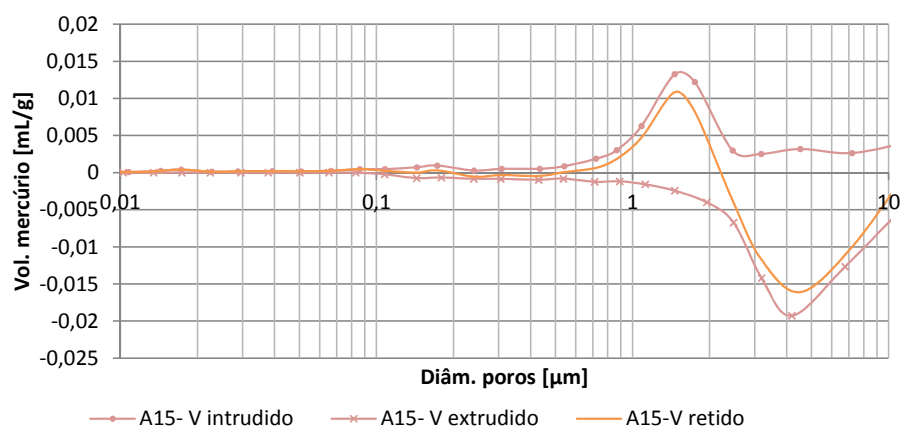


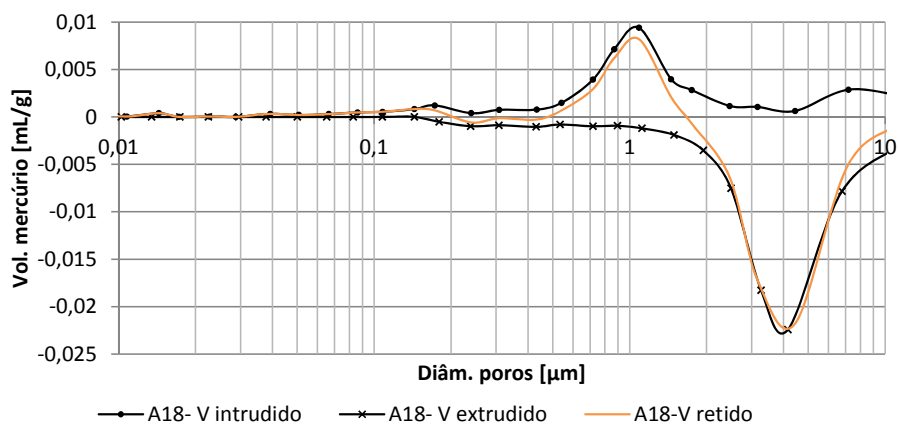
Fig. A.20: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do grupo 6.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A12.

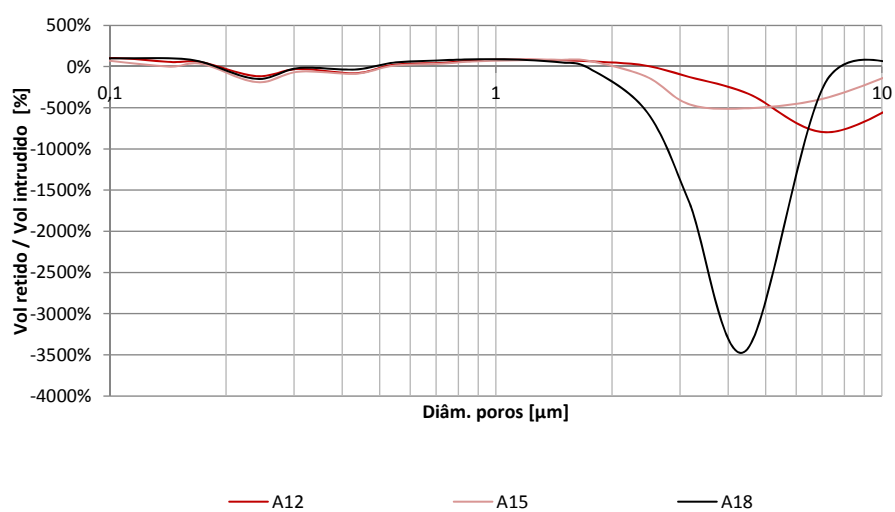


(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A15.

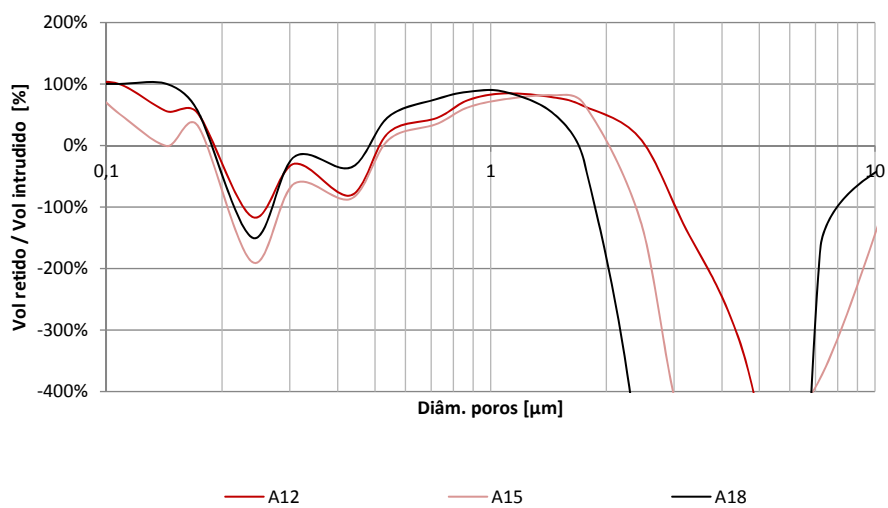


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A18.

Fig. A.21: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo 5.



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido .

Fig. A.22: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas bastardas do grupo 6.

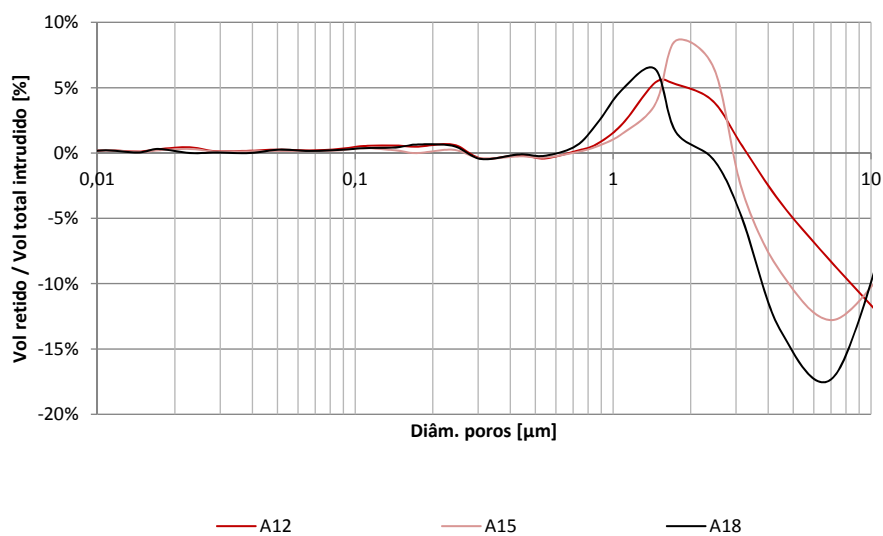
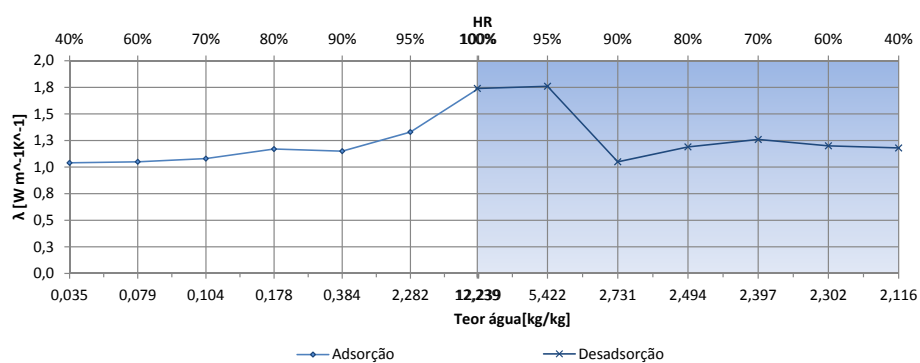
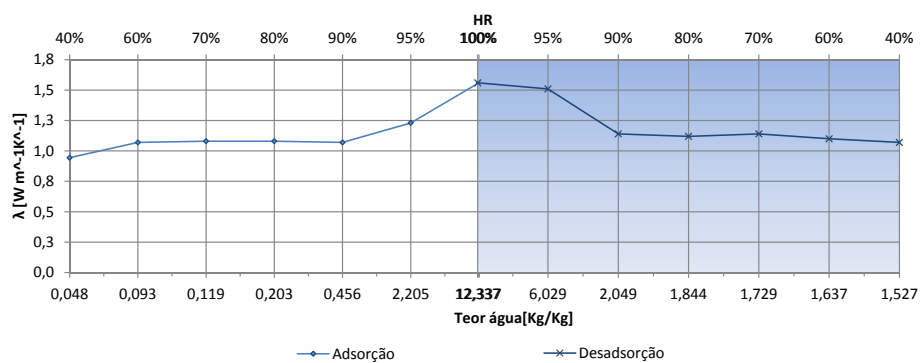


Fig. A.23: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas bastardas do grupo 6.

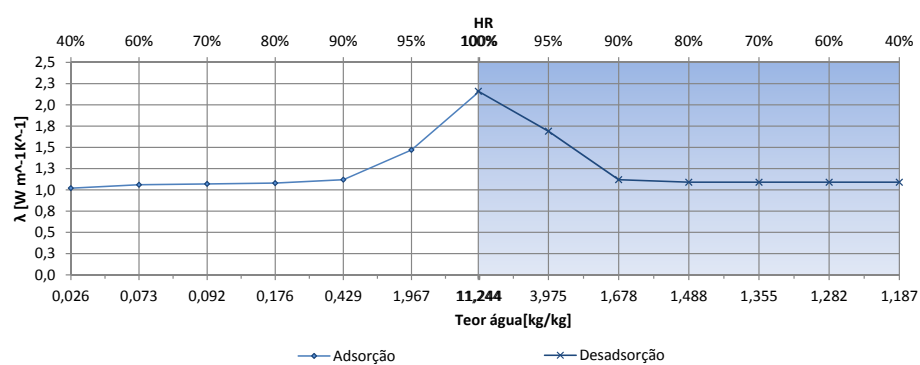
Condutibilidade térmica



(a) Argamassa A12



(b) Argamassa A15



(c) Argamassa A18

Fig. A.24: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas bastardas do grupo 6.

Anexo B

Resultados - Influência do volume água

B.1 Argamassas de cimento

B.1.1 Grupo B

Curvas higrscópicas

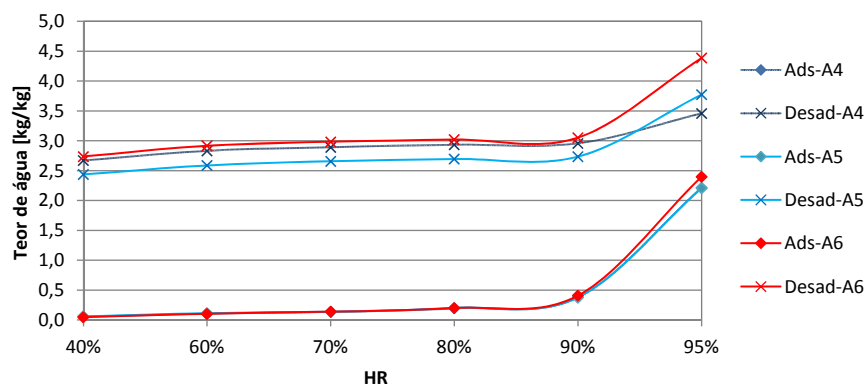


Fig. B.1: Curvas higrscópicas correspondentes às argamassas do grupo B.

Informação sobre a estrutura porosa

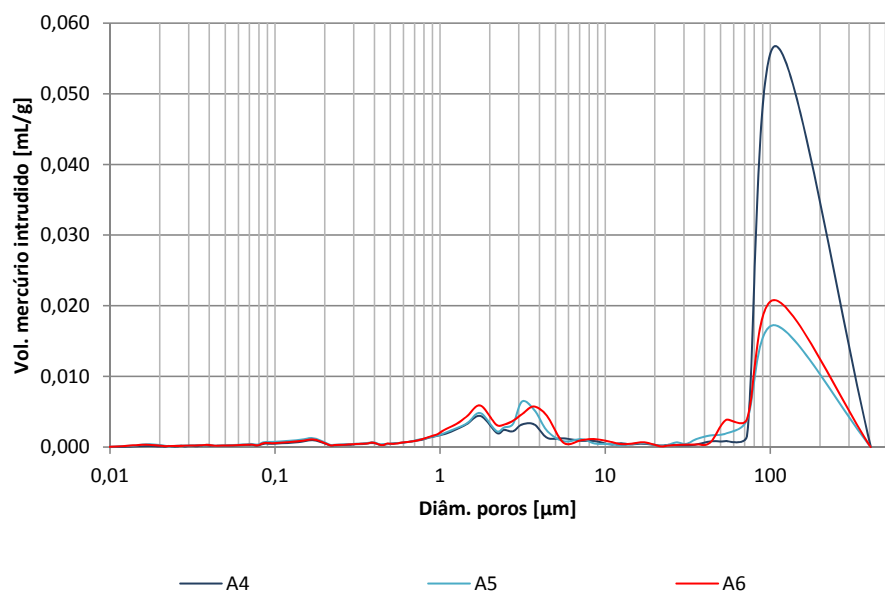
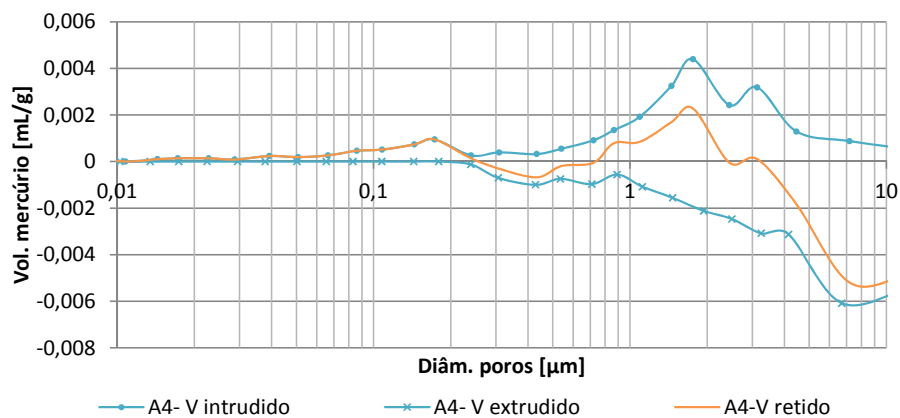
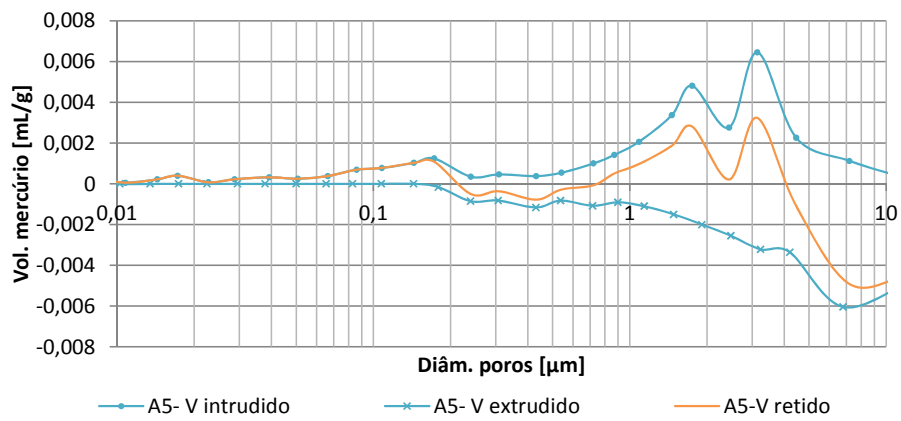


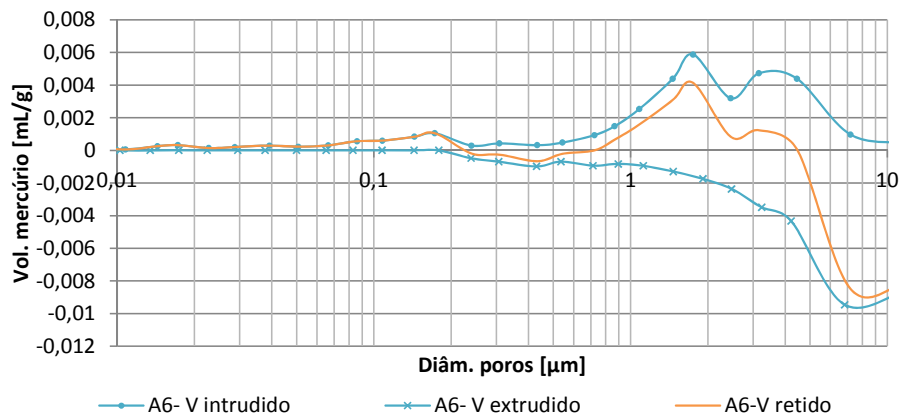
Fig. B.2: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do grupo B.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A4.

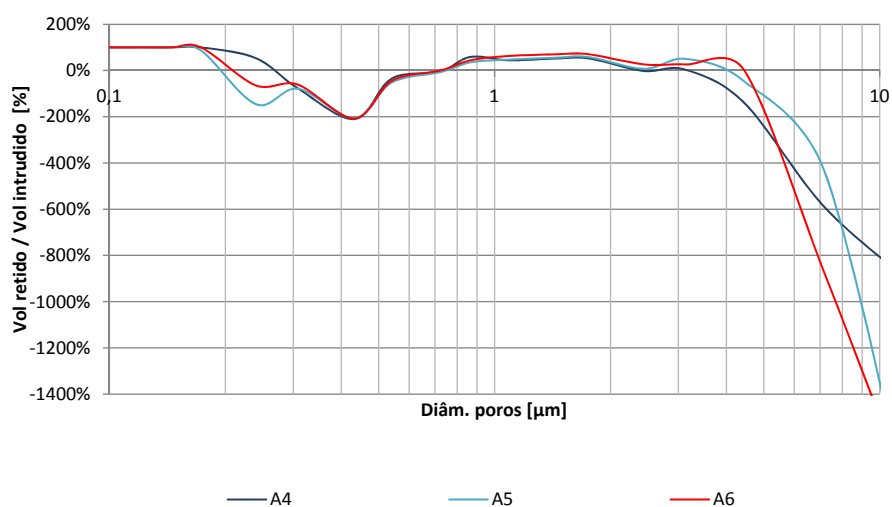


(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A5.

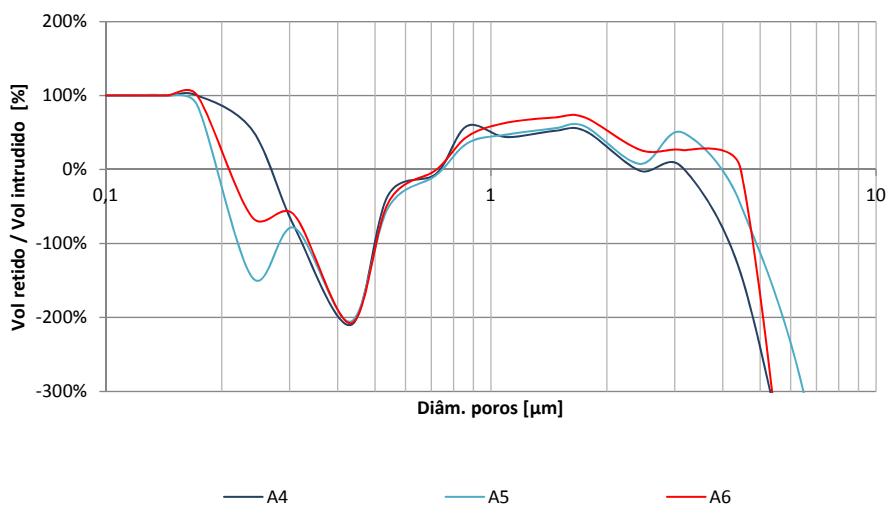


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A6.

Fig. B.3: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo B.



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido .

Fig. B.4: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do grupo B.

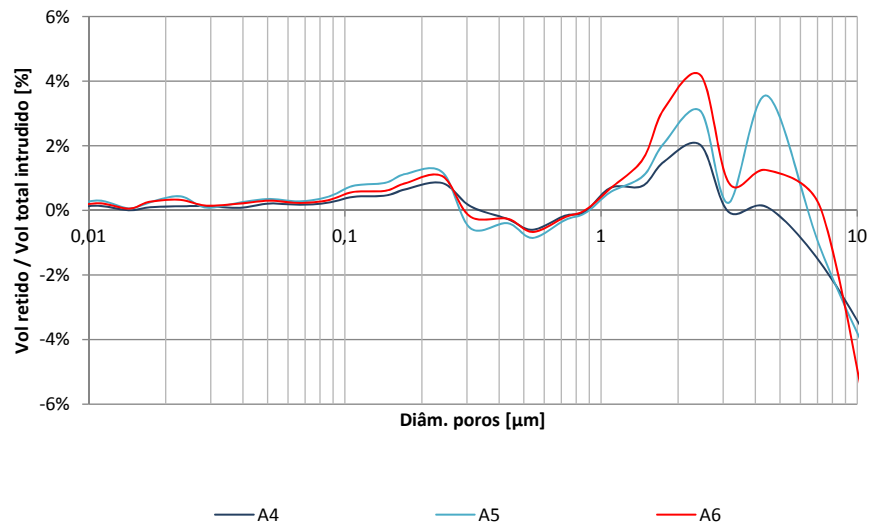
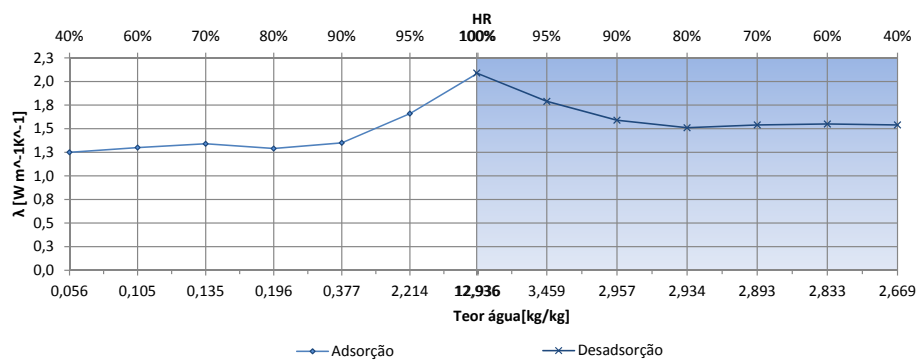
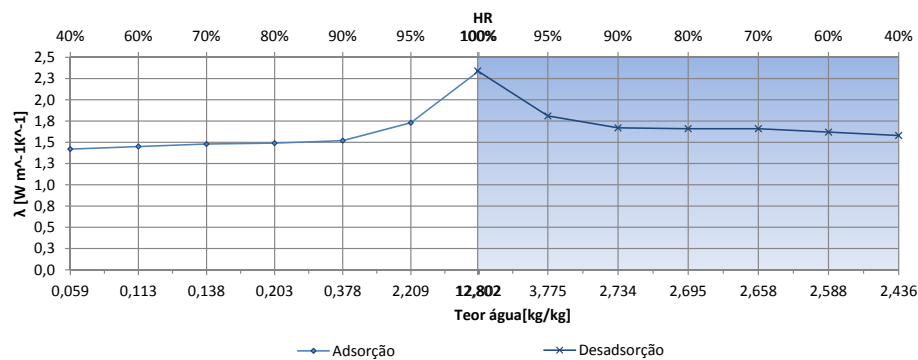


Fig. B.5: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do grupo B.

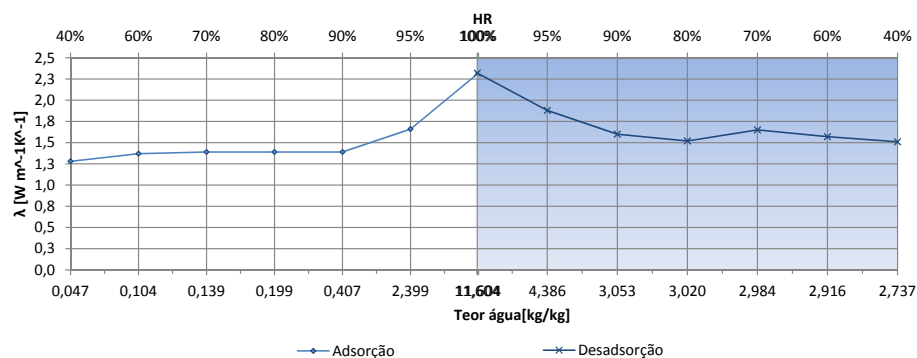
Condutibilidade térmica



(a) Argamassa A4



(b) Argamassa A5



(c) Argamassa A6

Fig. B.6: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do grupo 2.

B.1.2 Grupo C

Curvas higrscópicas

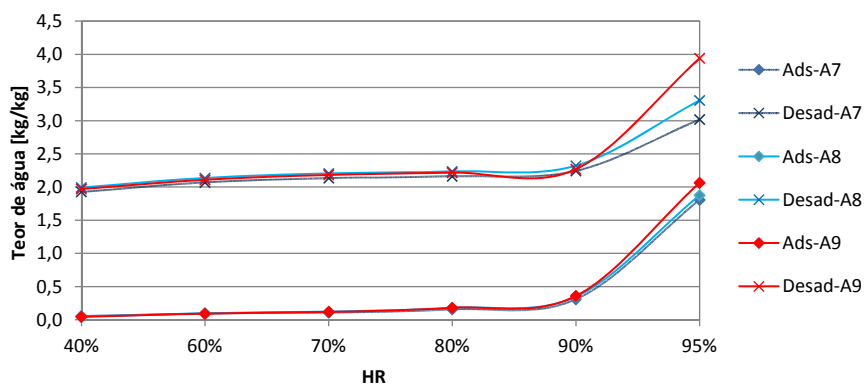


Fig. B.7: Curvas higrscópicas correspondentes às argamassas do grupo C.

Informação sobre a estrutura porosa

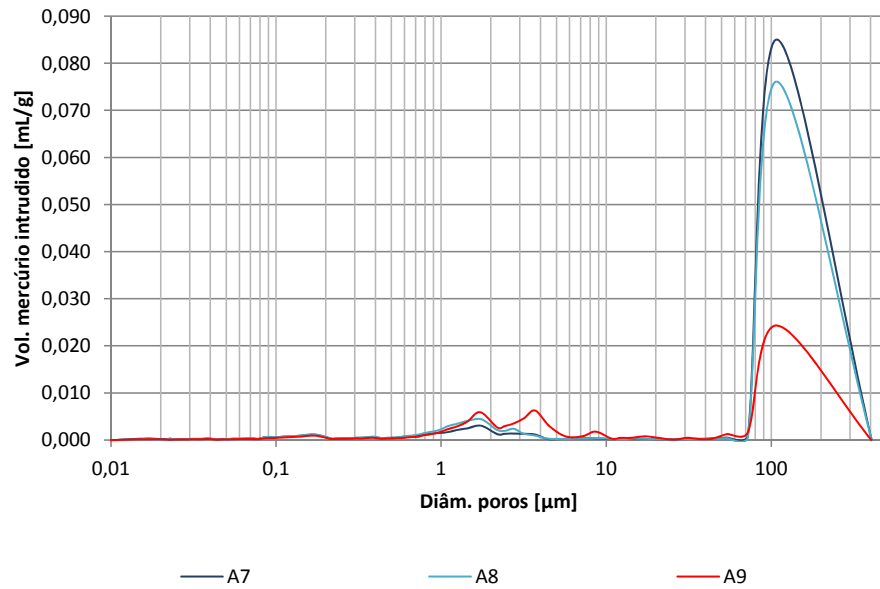
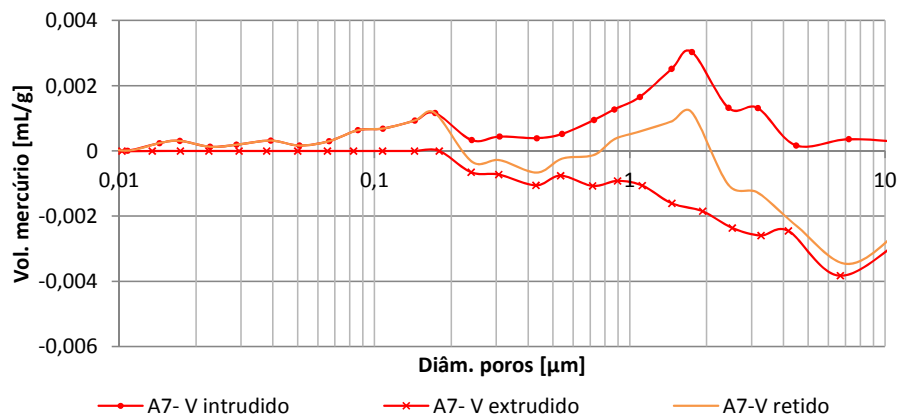
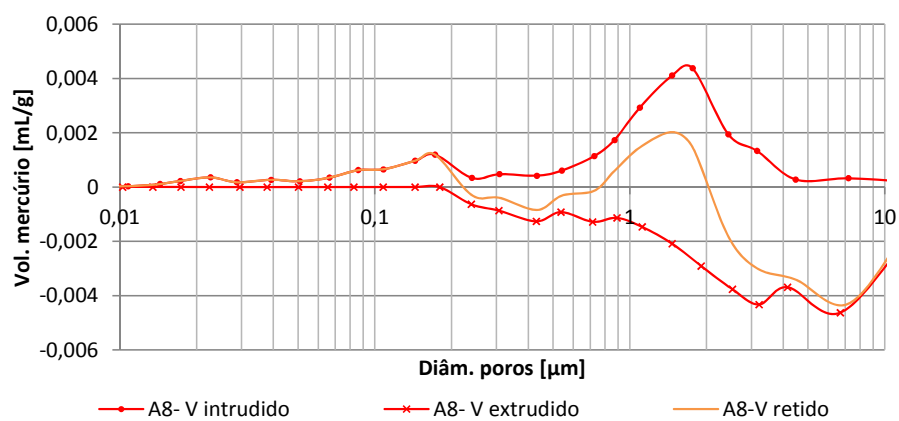


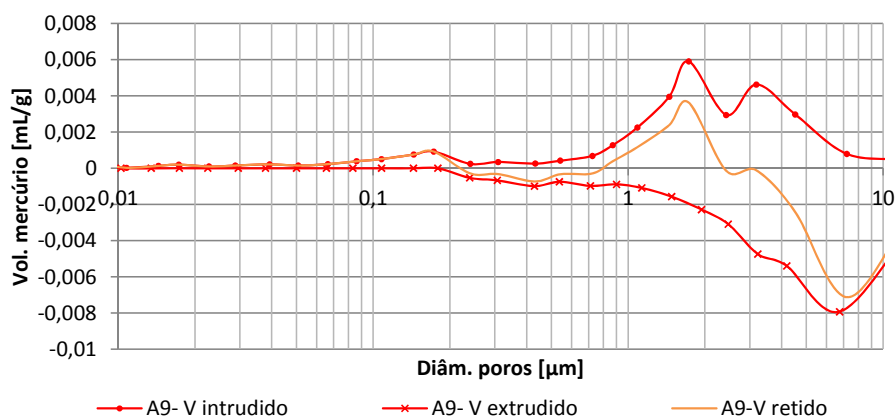
Fig. B.8: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas de cimento do grupo C.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A7.

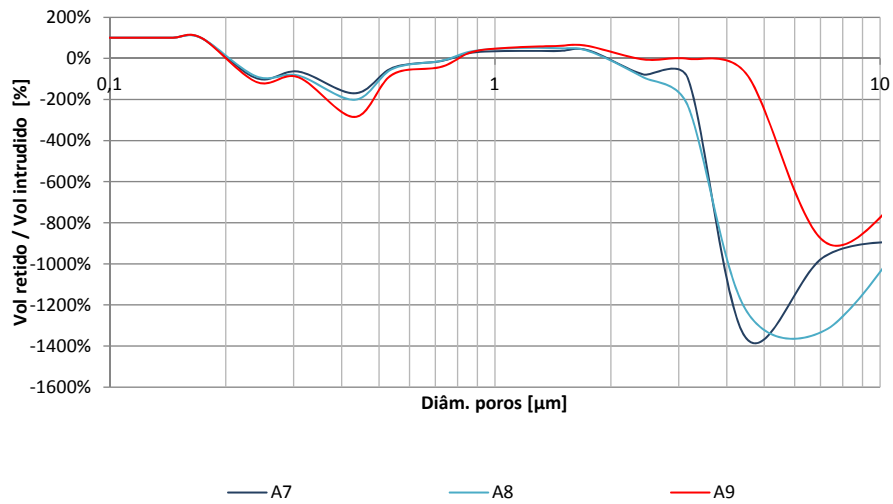


(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A8.

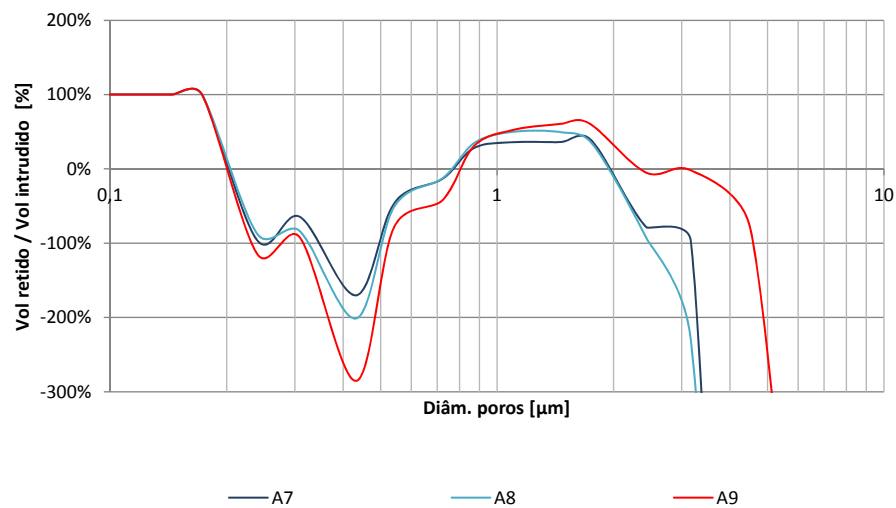


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A9.

Fig. B.9: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo C.



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido .

Fig. B.10: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas de cimento do grupo C.

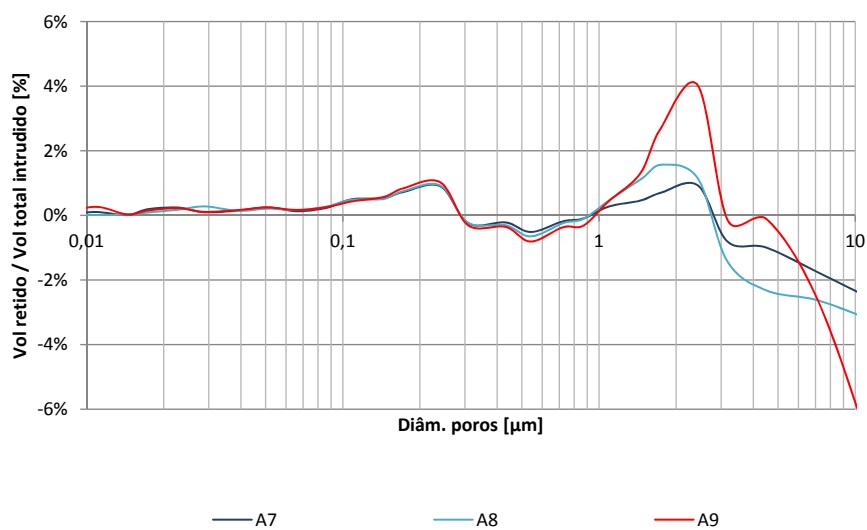
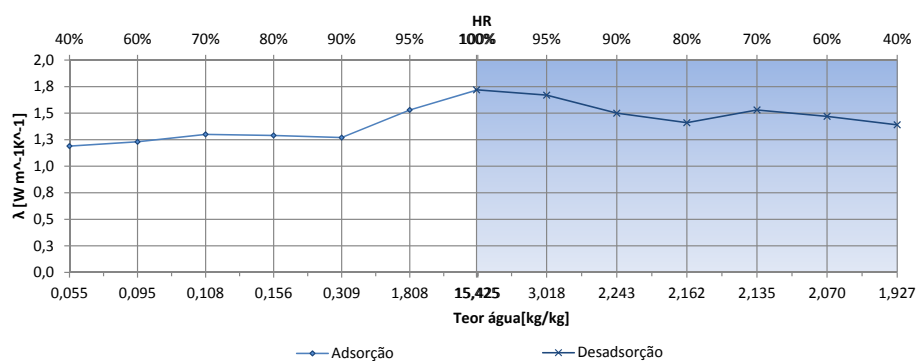
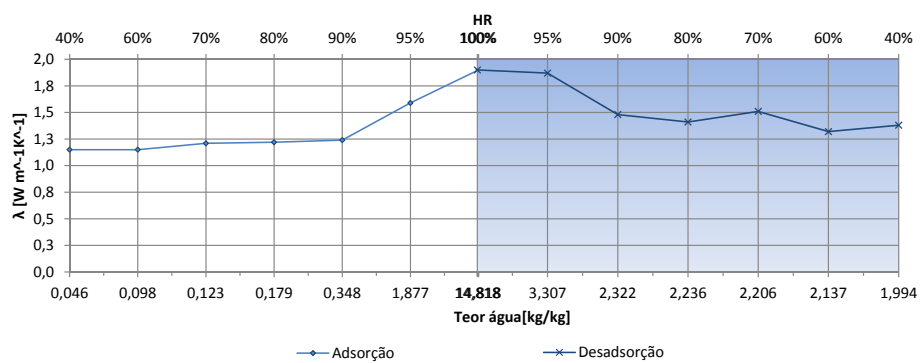


Fig. B.11: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas de cimento do grupo C.

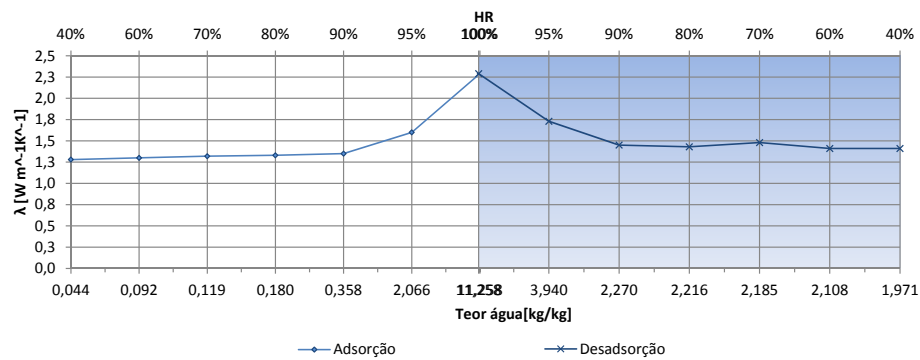
Condutibilidade térmica



(a) Argamassa A7



(b) Argamassa A8



(c) Argamassa A9

Fig. B.12: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas de cimento do grupo C.

B.2 Argamassas bastardas

B.2.1 Grupo E

Curvas higroscópicas

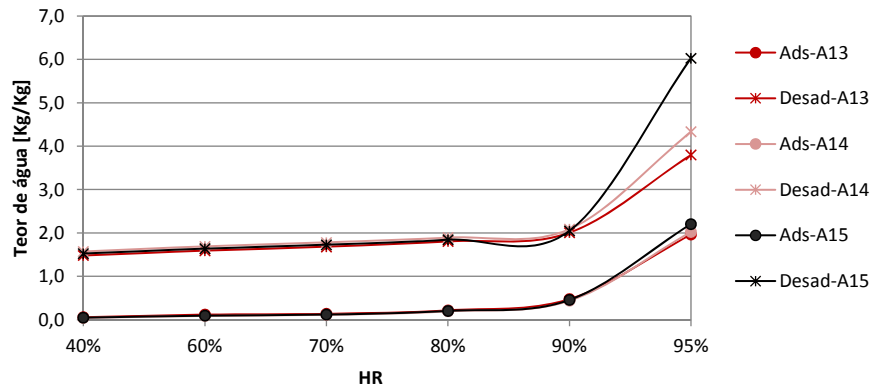


Fig. B.13: Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do grupo E.

Informação sobre a estrutura porosa

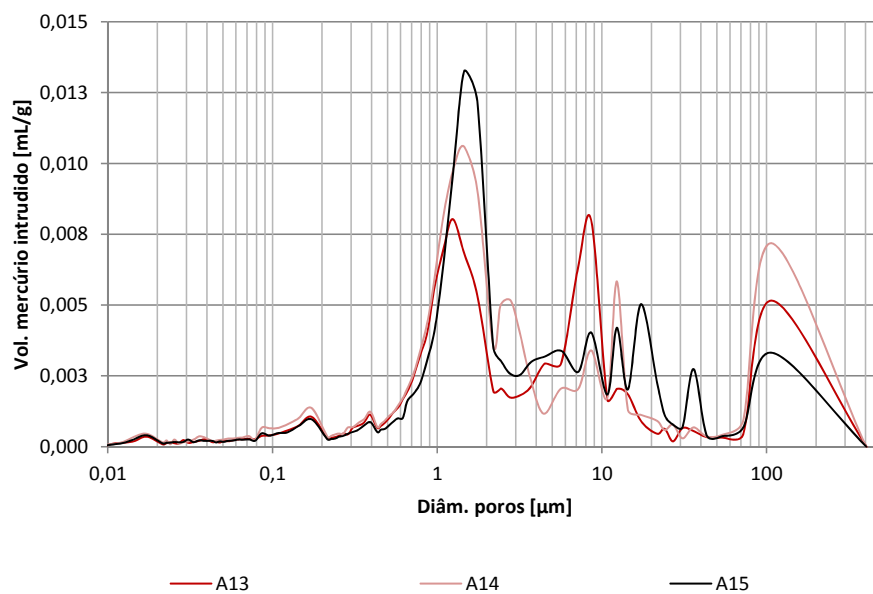
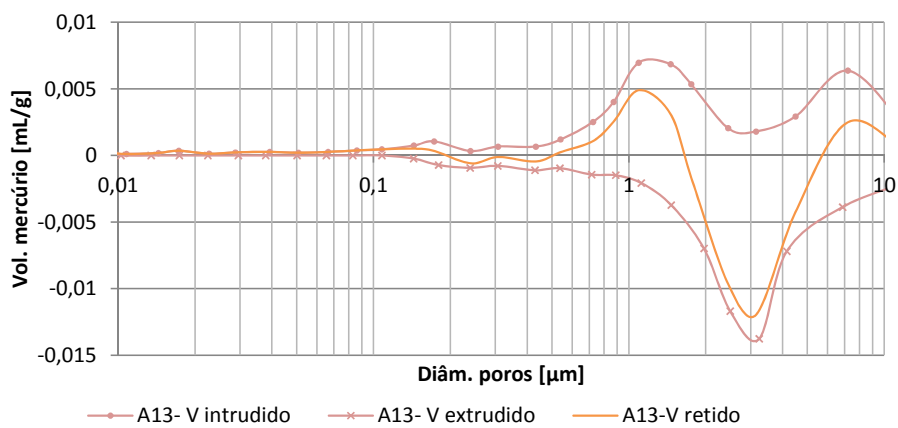
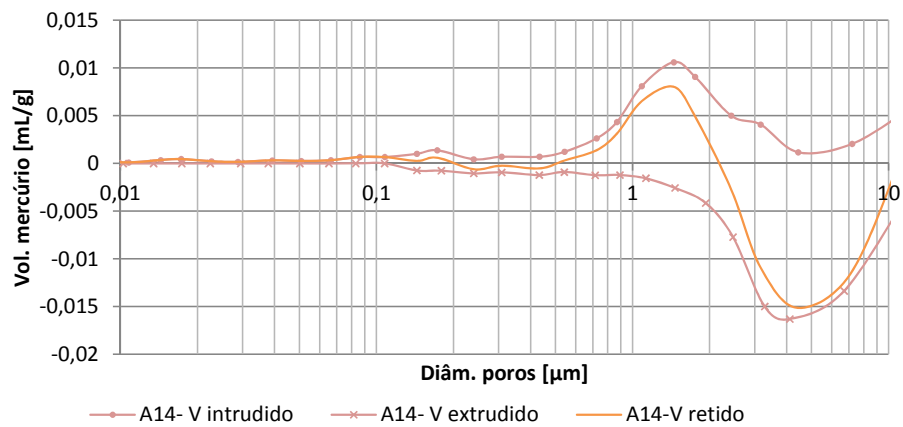


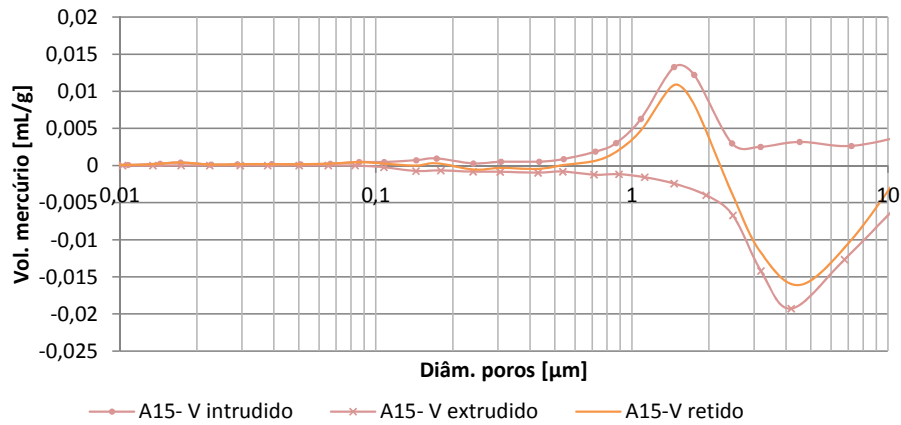
Fig. B.14: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do grupo E.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A13.

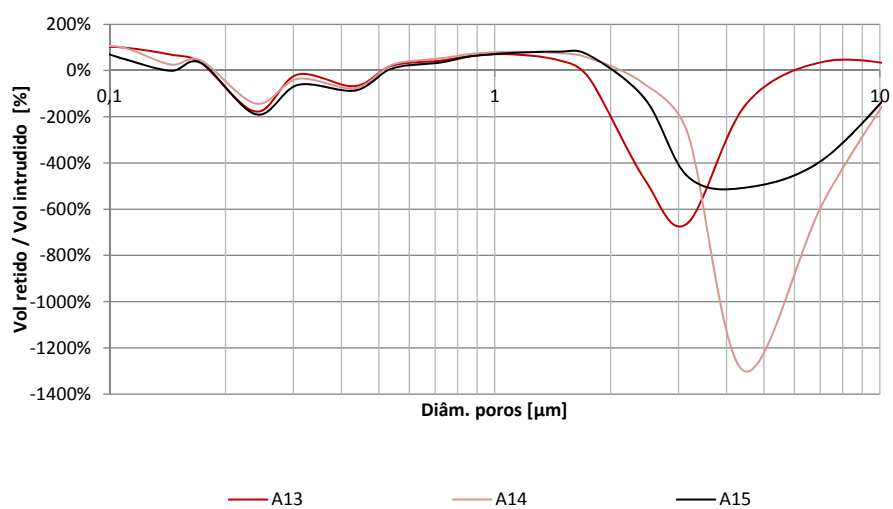


(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A14.

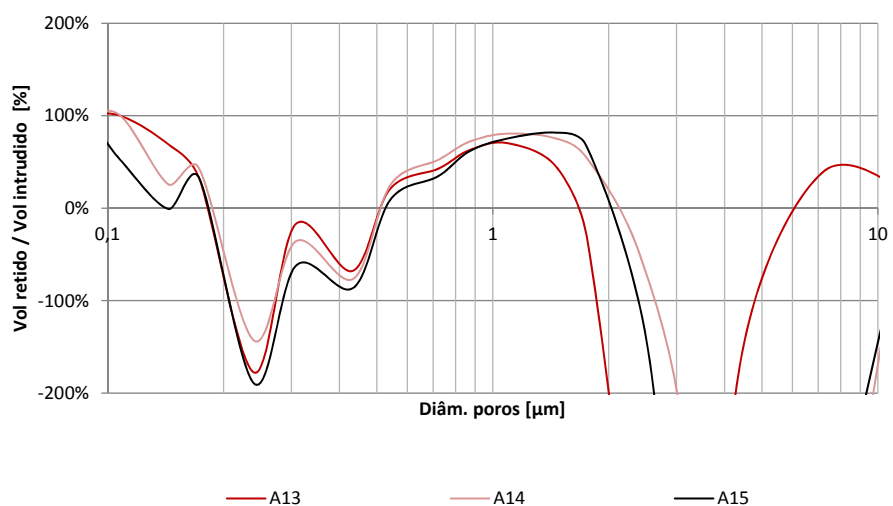


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A15.

Fig. B.15: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo E.



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido .

Fig. B.16: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas bastardas do grupo E.

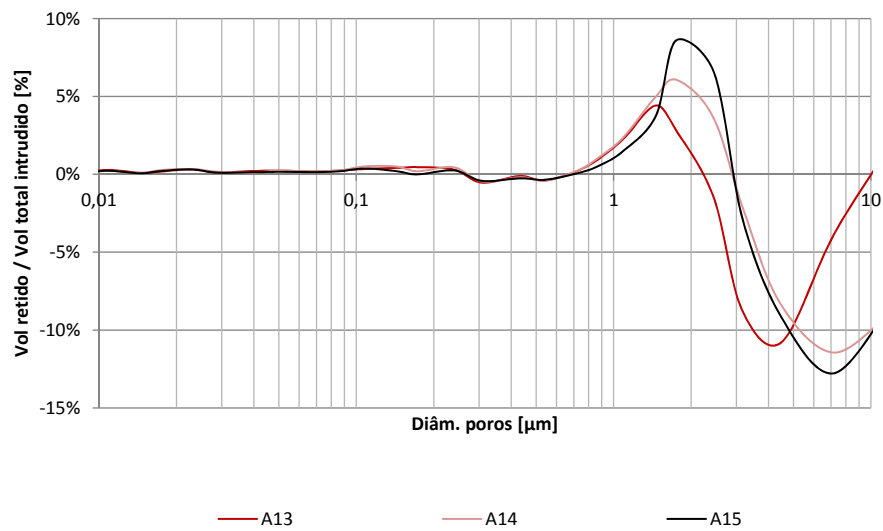
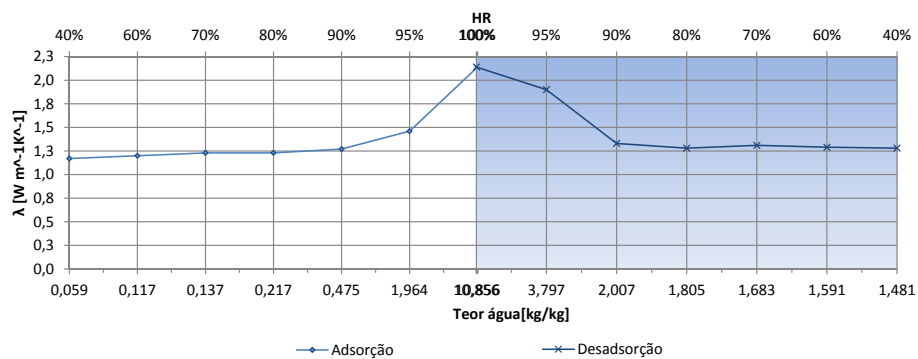
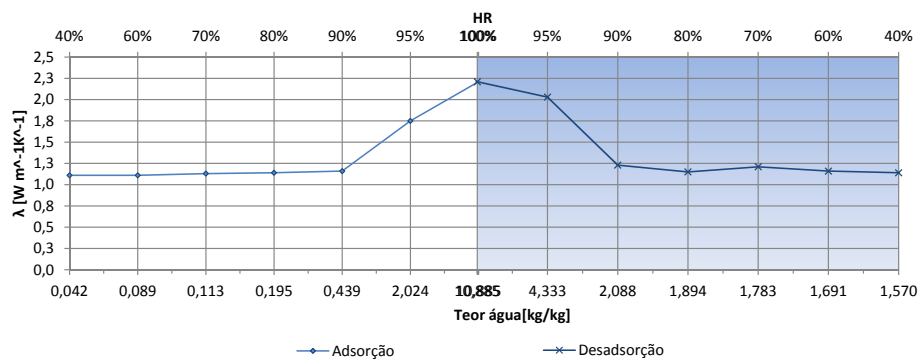


Fig. B.17: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas bastardas do grupo E.

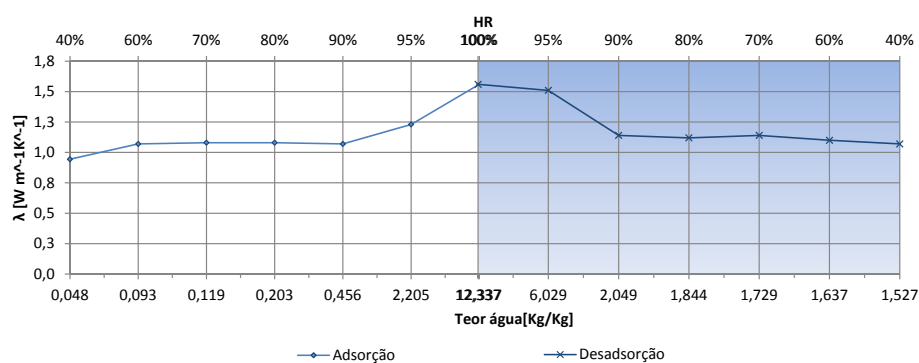
Condutibilidade térmica



(a) Argamassa A13



(b) Argamassa A14



(c) Argamassa A15

Fig. B.18: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas bastardas do grupo E.

B.2.2 Grupo F

Curvas higroscópicas

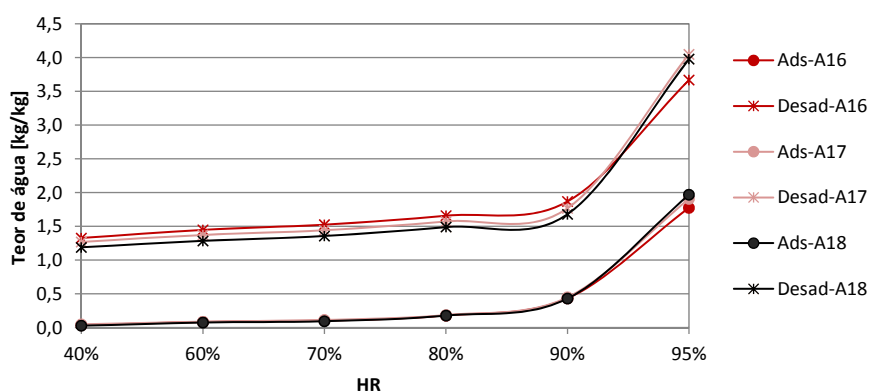


Fig. B.19: Curvas higroscópicas correspondentes às argamassas do grupo F.

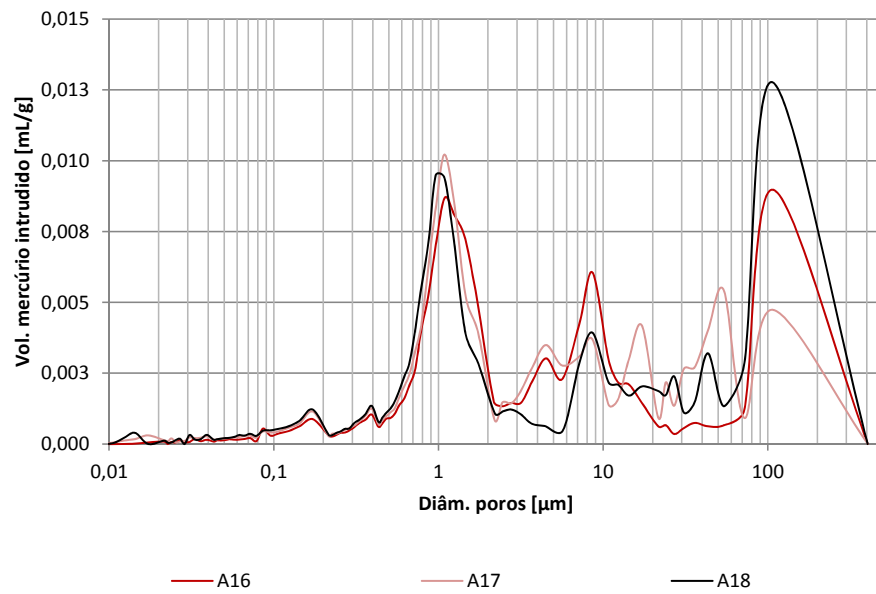
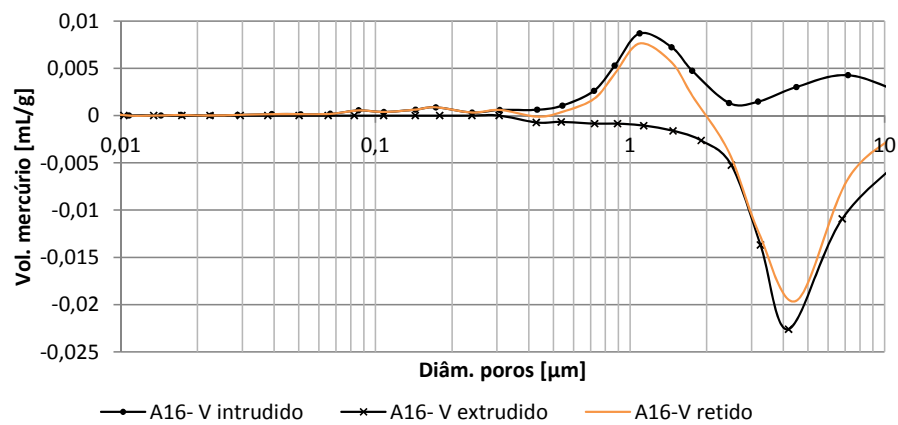
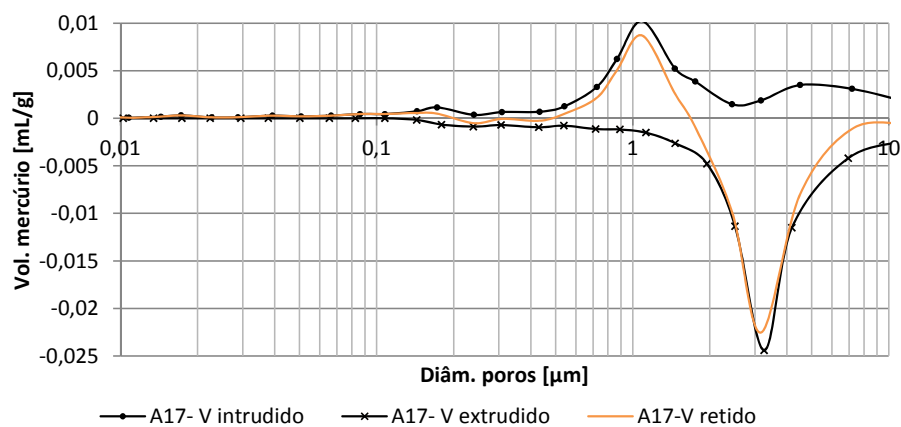


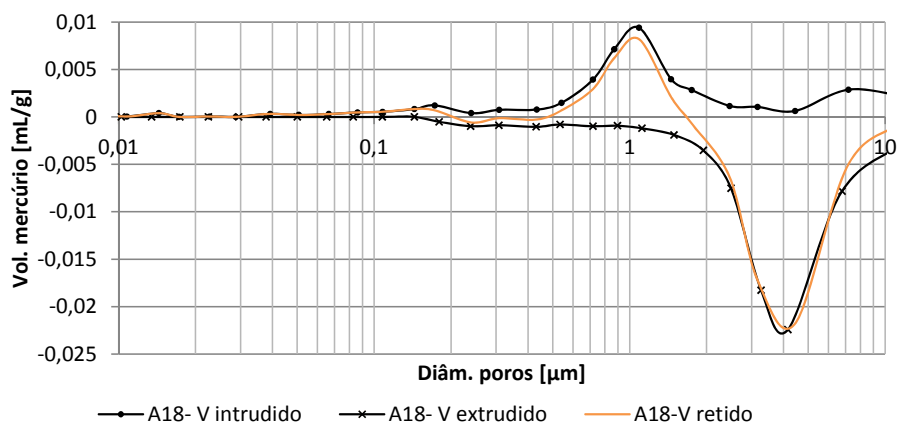
Fig. B.20: Distribuição de diâmetros de poros para as argamassas bastardas do grupo F.



(a) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A16.

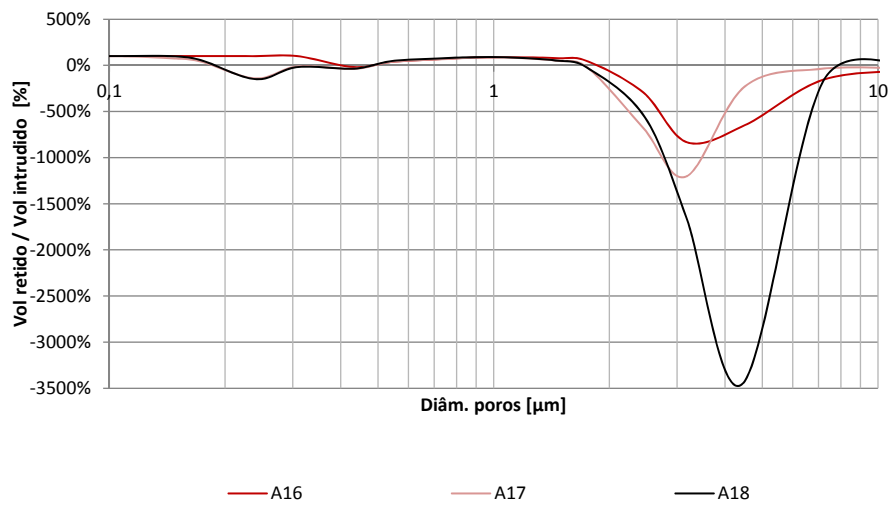


(b) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A17.

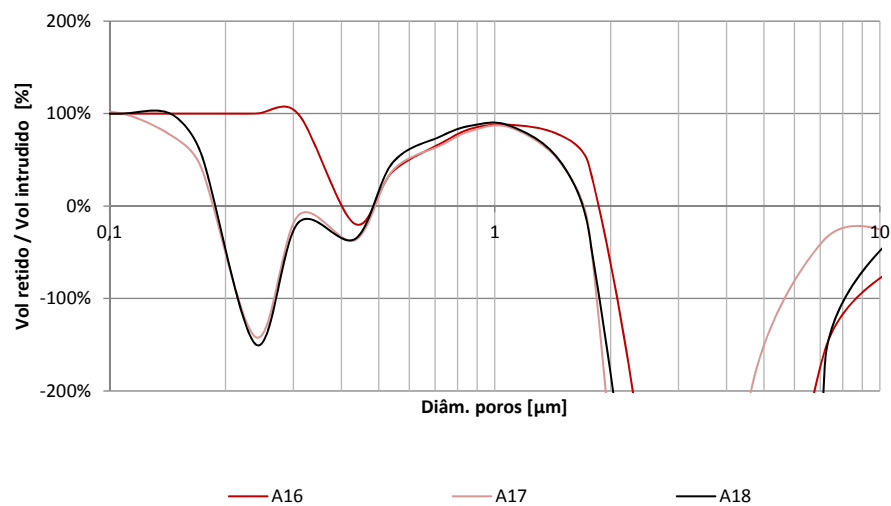


(c) Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para a argamassa A18.

Fig. B.21: Relação entre o volume incremental intrudido e extrudido para as argamassas do grupo F



(a) Relação entre o volume incremental retido e intrudido.



(b) Pormenor da relação entre o volume incremental retido e intrudido .

Fig. B.22: Relação entre o volume de mercúrio retido pelo volume intrudido em cada diâmetro para as argamassas bastardas do grupo F.

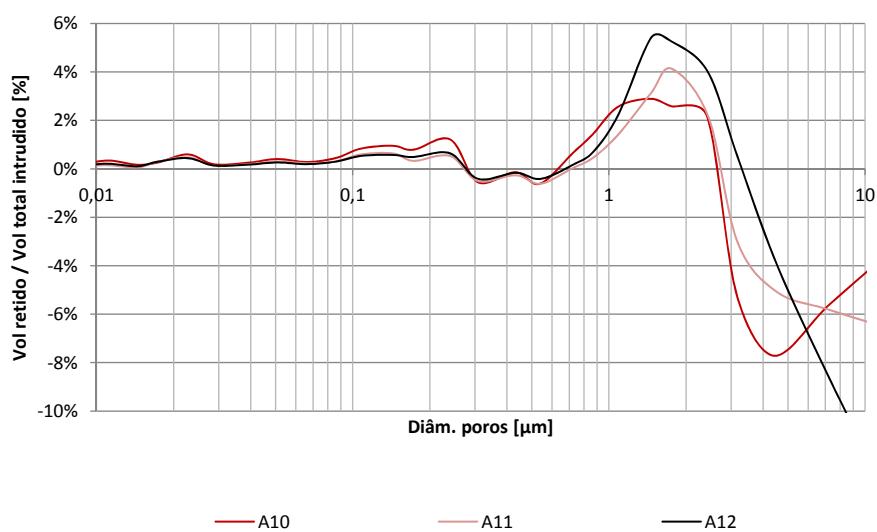
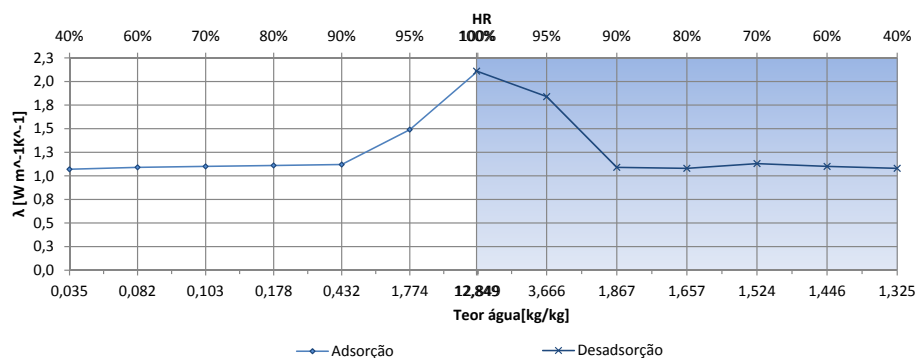
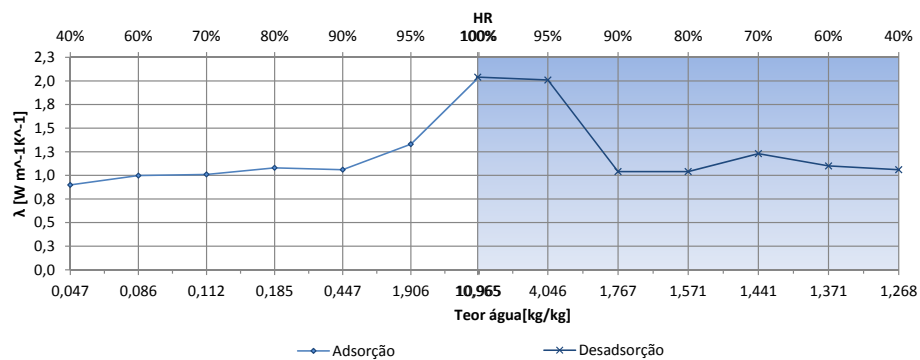


Fig. B.23: Relação entre o volume de mercúrio retido e o volume total intrudido para as argamassas bastardas do grupo F.

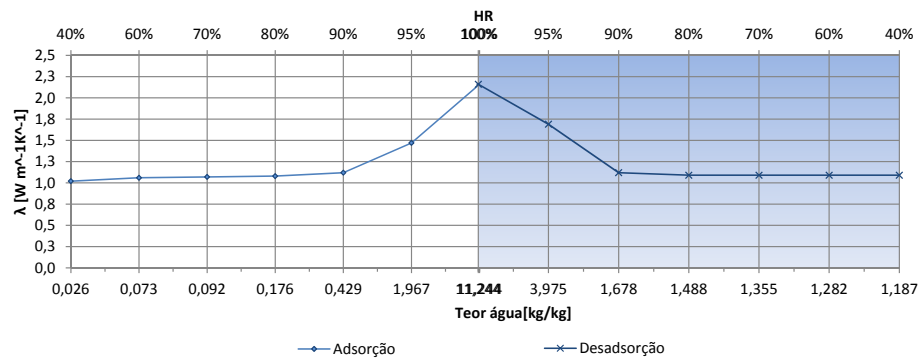
Condutibilidade térmica



(a) Argamassa A16



(b) Argamassa A17



(c) Argamassa A18

Fig. B.24: Evolução da condutibilidade térmica em função do teor de água para as argamassas bastardas do grupo F.

Anexo C

Publicação - Efeitos da humidade higroscópica no comportamento térmico dos materiais

ISOLAMENTO E IMPERMEABILIZAÇÃO

EFEITOS DA HUMIDADE HIGROSCÓPICA

NO COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS

MATERIAIS

João Tiago J. M. Correia, Mestrando em Engenharia Civil, DEC-FCT-UNL
 Fernando M. A. Henriques, Professor Catedrático, DEC-FCT-UNL

INTRODUÇÃO

Numa altura em que a sustentabilidade da construção é um conceito cada vez mais relevante e as questões relacionadas com a economia de energia assumem cada vez mais uma importância acrescida, torna-se necessário incrementar o nível de conhecimento do comportamento dos materiais e soluções construtivas quando sujeitos a diferentes condições ambientais, indo para além dos aspetos comuns que usualmente são tidos em conta. É particularmente relevante avaliar o modo como os materiais correntemente aplicados na execução das soluções construtivas vulgares se comportam quando sujeitos à influência das variações normais da humidade relativa. É conhecido o comportamento higroscópico de vários materiais, de que a madeira ou os materiais à base de gesso são dos exemplos bem evidentes [7]. No entanto, no que se refere a outros materiais igualmente correntes, esse comportamento é pouco conhecido e virtualmente ignorado na utilização corrente, apesar das consequências negativas que daí podem decorrer.

A variação da humidade relativa (HR) do ambiente reflete-se nos materiais através de um aumento ou diminuição do seu teor de água decorrente das suas condições de adsorção e desadsorção, entendidas neste contexto como os mecanismos de adesão de moléculas de

conceito que não deve ser confundido com absorção que corresponde à migração de água líquida no interior dos poros. Como se verá neste artigo, essa variação de teor de água influencia diretamente a condutibilidade térmica dos materiais, podendo originar fenómenos inesperados de condensações superficiais ou internas, para além de poder influenciar as suas condições de degradação.

Em condições correntes a determinação da condutibilidade é feita com os materiais previamente condicionados em ambientes a 23 °C e 50% de humidade relativa até atingirem o equilíbrio. Isso significa que quaisquer acréscimos de teor de água para além dos valores correspondentes àquele equilíbrio poderão conduzir a aumentos da condutibilidade, pelo que facilmente se compreende que o comportamento real das soluções construtivas pode ser bastante diferente do estimado pelo método de Glaser, no caso das condensações internas, ou pela simples análise de condensações superficiais.

A generalidade dos materiais porosos com porosidade aberta apresenta um comportamento higroscópico, pelo que adsorvem vapor de água do ar em função das condições higrótérmicas existentes. Se esse facto é evidente nas zonas superficiais dos elementos construtivos, não deixa também de ocorrer no interior desses elementos. Com efeito, se por definição a humidade relativa pode ser obtida através do quociente entre a concentração de vapor de água (Λ) e o limite de saturação

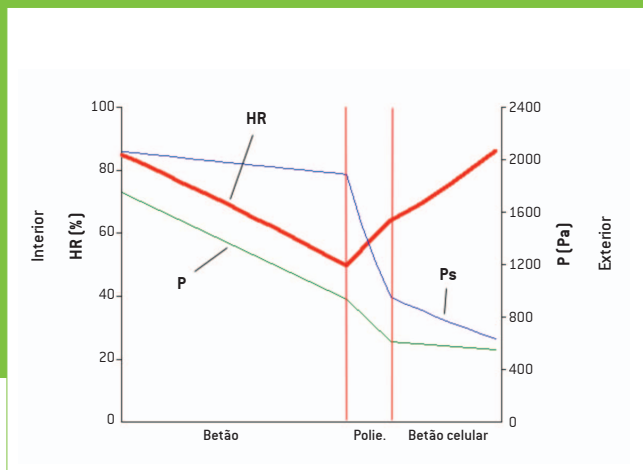
correspondente à temperatura existente (Λ_s), ela também pode ser calculada pela relação entre a pressão parcial de vapor de água (P_v) e a pressão de saturação correspondente à temperatura nesse ponto ($P_{v,sat}$).

$$HR = \frac{\Lambda}{\Lambda_s} = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad \text{Eq. 1}$$

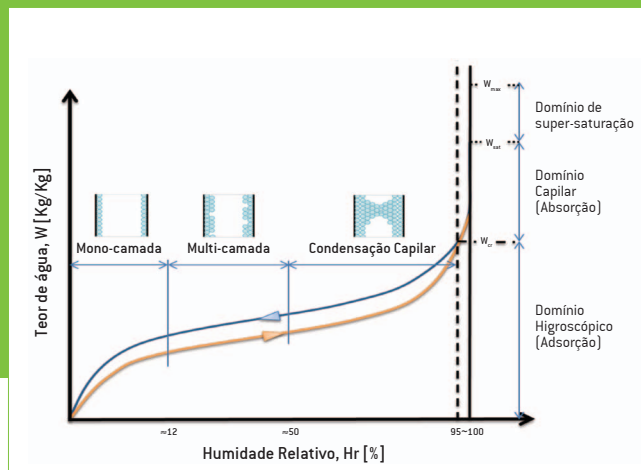
A aplicação do conceito ao método de Glaser conduz a situações como as que se ilustram na fig. 1 onde se incluem os valores de humidade relativa obtidos a partir dos valores das pressões parciais e de saturação em cada ponto [4]. Se bem que em nenhum ponto ocorram condensações, devem notar-se os valores elevados de humidade relativa na generalidade dos pontos do interior que influenciarão as condutibilidades térmicas, diminuindo a resistência térmica da parede. Desse modo, poderão ocorrer eventuais condensações superficiais ou internas em consequência da simples difusão de vapor de água através de um elemento construtivo.

A evolução dos mecanismos de adsorção/desadsorção pode ser recriada em laboratório através da exposição dos materiais a condições ambientais diferentes utilizando-se para esse fim uma câmara climática que permite controlar a temperatura e a HR ambiente e fazê-las variar ao longo do tempo.

As características da estrutura porosa dos materiais desempenham um papel importan-



> 1



> 2

te nos ciclos adsorção-desadsorção. A lei de Kelvin permite relacionar duas entidades que à partida pareceriam distintas: os raios dos poros e o valor da umidade relativa para o qual ocorre a saturação. Com efeito, a equação que traduz (equação 2) relaciona a umidade relativa para a qual ocorre saturação com as características do menisco existente, definido em termos da sua curvatura e das características do fluido e das superfícies. Nessa equação HR representa a umidade relativa, ρ_w a massa volumica da água, σ a tensão superficial do fluido, 2θ o ângulo de contacto (que para a água é assumido como zero), r o raio médio do poro, R a constante dos gases e T a temperatura absoluta

$$HR = e^{\left[\frac{-2\sigma \cos \theta}{r \rho_w RT} \right]} \quad \text{Eq. 2}$$

Igualando as equações 1 e 2 é possível perceber que a pressão sobre um menisco com uma dada curvatura é tanto menor (comparativamente com a pressão de saturação à temperatura existente) quanto menor for o raio do poro onde o menisco ocorra.

$$P_v = P_{v, \text{sat.}} \cdot e^{\left[\frac{-2\sigma \cos \theta}{r \rho_w RT} \right]} \quad \text{Eq. 3}$$

OBJETO DO ESTUDO

Quando se sujeitam amostras de materiais porosos a vários níveis de umidade relativa, registando os respetivos valores de teores

de água quando atinjam o equilíbrio com os vários ambientes, é possível a construção de gráficos que representam a evolução destas duas variáveis, os quais assumem a configuração genérica que se apresenta na fig. 2. Nesse gráfico é possível distinguir duas fases, a primeira das quais determina o domínio higroscópico em que predominam os fenómenos da adsorção, seguida por outra para valores de HR superiores a 95%, onde a difusão ocorre em consequência dos fenómenos de absorção. A análise da figura permite distinguir três zonas dentro do domínio higroscópico: a zona de mono-camada, caracterizada pela fixação de uma fina camada de moléculas de água às paredes dos poros (esta adesão deve-se a forças intermoleculares na interface sólido-líquido), a zona multi-camada, na qual ocorre uma sobreposição de camadas de moléculas de água e finalmente a zona de condensação capilar, na qual a união entre camadas de zonas opostas do poro propicia a formação de meniscos.

Dado que o incremento de HR origina a adsorção, o processo inverso motiva a desadsorção. Idealmente, o traçado do gráfico de ambos os fenómenos para um mesmo material deveria ser coincidente. No entanto, para a maioria dos materiais de construção este fenómeno não ocorre (fig. 2), ocorrendo histerese. A razão desta histerese não se encontra ainda bem definida, sendo contudo admitido que deverá resultar da estrutura porosa dos materiais, mais concretamente da porometria e da morfologia dos poros.

Estas duas características podem ser analisadas através de um ensaio de intrusão

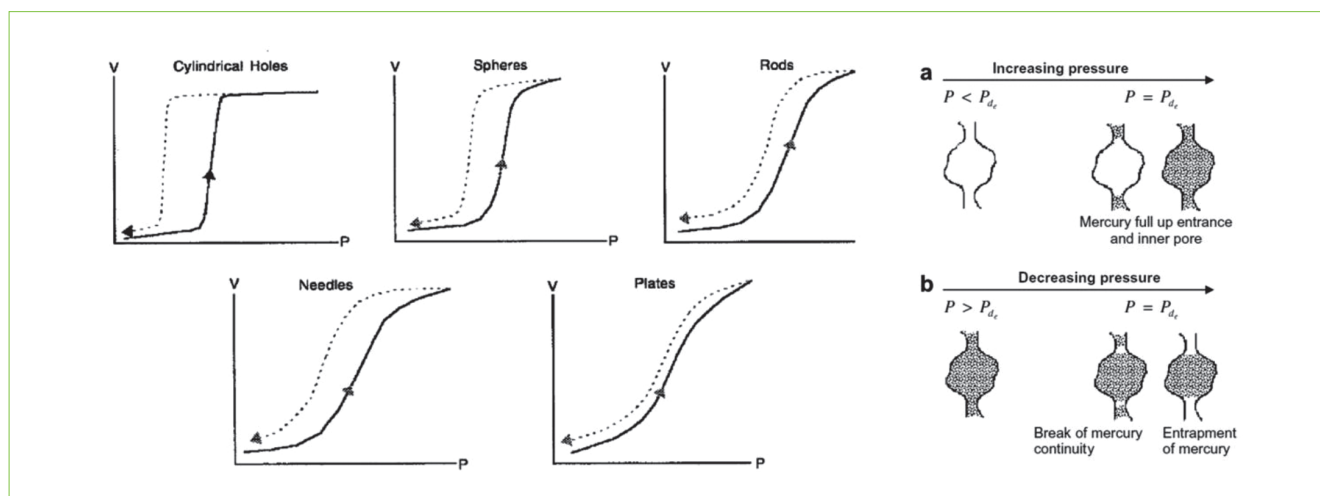
de mercúrio, onde uma pequena amostra do material é sujeita a um ciclo de intrusão/extrusão através do acréscimo e posterior diminuição de pressão, sendo registadas as variações de volume de mercúrio ao longo do processo. As tipologias de curvas passíveis de serem geradas neste ensaio estão representadas na fig. 3, através das quais é possível determinar a morfologia de poros predominante em cada material. Deve notar-se que este efeito histerético apenas ocorre quando os materiais entrem na zona de condensação capilar, sendo que o seu efeito é tanto maior quanto maior o valor de HR relativa alcançado.

Assim, para um mesmo valor de umidade relativa em situação de desadsorção o teor de água de um dado material pode ser significativamente superior ao seu valor aquando da adsorção. O facto de se negligenciar o efeito da histerese na curva de armazenamento de umidade poderá levar, em alguns materiais, a subestimar-se os riscos envolvidos [6].

A análise experimental baseou-se na norma ASTM C 1498:04 [1] e consistiu na criação de ambientes artificiais numa câmara climática, com valores de HR a variar entre os 40% e os 95% em condições isotérmicas a 23 °C, de modo a permitir a obtenção de curvas higroscópicas experimentais. Paralelamente, a estrutura porosa de cada uma das amostras foi analisada com um porosímetro de mercúrio, sendo assim possível relacionar os fenómenos com as dimensões dos poros. No presente artigo são apresentados os resultados de 18 argamassas com traços diferentes,

> Figura 1: Exemplo dos valores de umidade relativa numa parede [4].

> Figura 2: Andamento típico das curvas de armazenamento de umidade em condições isotérmicas. Adaptado de [3].



> 3

analisadas essencialmente do ponto de vista da influência da quantidade de ligante nos traços, mantendo estável o volume de água. As várias composições agrupadas em função das respetivas quantidades de água são apresentadas no quadro 1.

Quadro 1 Composição das argamassas analisadas.

	V cimento [cm ³]	V cal [cm ³]	V H ₂ O [cm ³]	Relação a/L
A1	66,7		40	0,6
A4	50		40	0,8
A7	40		40	1,0
A2	66,7		46,7	0,7
A5	50		46,7	0,9
A8	40		46,7	1,2
A3	66,7		53,3	0,8
A6	50		53,3	1,1
A9	40		53,3	1,3
A10	33,3	33,3	40	0,6
A13	22,2	44,4	40	0,6
A16	16,7	50	40	0,6
A11	33,3	33,3	46,7	0,7
A14	22,2	44,4	46,7	0,7
A17	16,7	50	46,7	0,7
A12	33,3	33,3	53,3	0,8
A15	22,2	44,4	53,3	0,8
A18	16,7	50	53,3	0,8

ANÁLISE DE DADOS

Argamassas de cimento

As curvas de adsorção e desadsorção das argamassas A1, A4 e A7 são apresentadas na fig. 4. Apesar de a argamassa A7 apresentar um maior valor de adsorção, a observação das curvas na zona higroscópica permite constatar que é a argamassa A1 que apresenta o maior teor de água global durante as fases de adsorção e desadsorção. Esse comportamento diferente das várias argamassas pode ser explicado através da análise da estrutura porosa de cada uma das três amostras (fig. 5), tendo em conta que existe uma relação direta entre o volume de mercúrio intrudido numa dada gama de diâmetros e a quantidade de poros existentes com essas dimensões. Da análise da fig. 5 resulta que um maior volume de ligante origina uma maior quantidade de poros de pequenas dimensões, diminuindo a quantidade de poros maiores. Por outro lado, em todas as argamassas de cimento analisadas o volume total de poros maiores que 100 μm é significativamente superior quando comparado com qualquer outra gama de diâmetros da amostra.

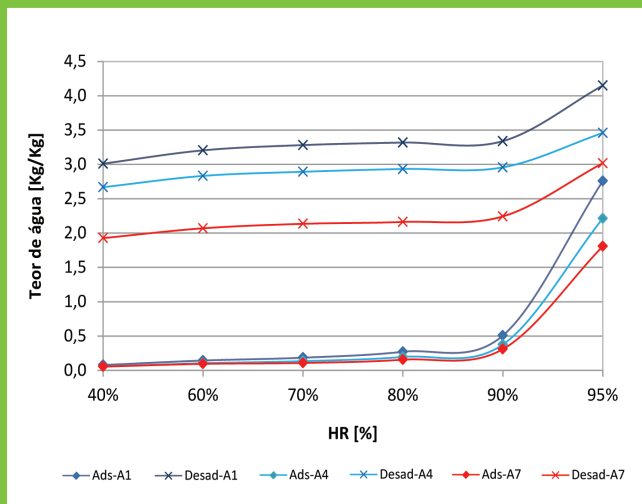
De modo a justificar a ocorrência de um maior

efeito histerético analisar-se-á a morfologia dos poros tomando como exemplo um poro do tipo tinteiro representado na fig. 6.

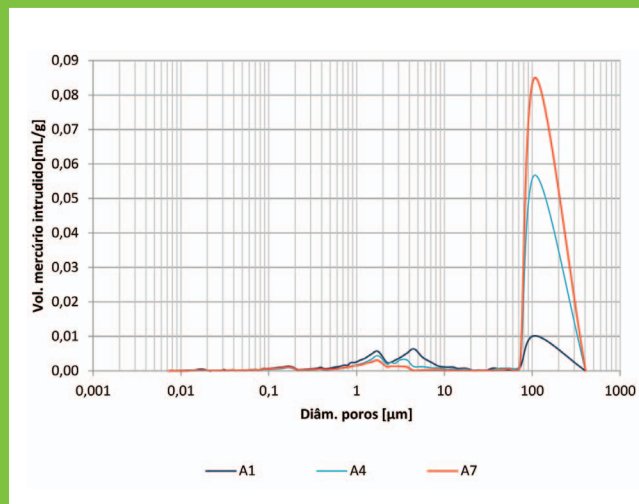
A ocorrência de maiores efeitos histeréticos depende da morfologia dos poros. Tomando como exemplo um poro do tipo tinteiro representado na fig. 6, a equação 2 permite constatar que o valor da humidade relativa para a qual ocorrem condensações capilares é tanto menor quanto menor a dimensão dos poros. Nas situações em que não exista continuidade de água, ou seja, em que ocorram espaços com ar entre zonas de água, a água que se encontre retida na zona 2, cujo raio do menisco é superior, criará um equilíbrio a uma humidade relativa superior do que o que se estabelecerá na zona 1, o que significa que a migração de vapor ocorrerá dos meniscos das zonas de maior raio para as de menor raio. Daí decorre que são os poros de menores dimensões que controlam o processo de desadsorção, gerando assim o fenómeno histerético durante esse processo. Quanto maior for o valor de humidade relativa atingido durante a adsorção, maior o efeito histerético durante a desadsorção [5, 8].

No caso das argamassas de cimento ensaiadas, a análise comparativa entre os grupos do quadro 1 permitiu constatar que um maior de volume de cimento origina uma maior percen-

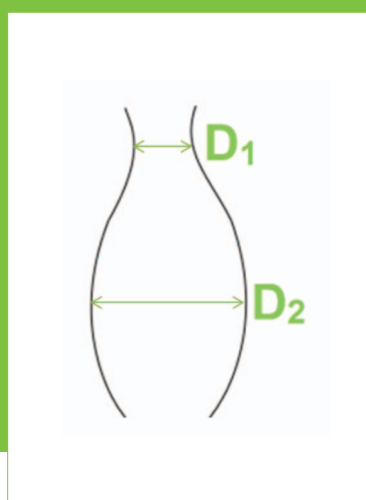
> Figura 3: Exemplo de ciclos de intrusão/extrusão por porosimetria de mercúrio [2].



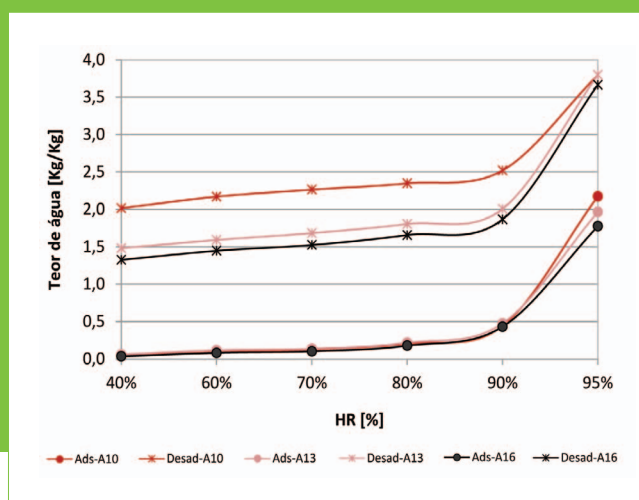
> 4



> 5



> 6



> 7

tagem de poros de pequenas dimensões e a correspondente diminuição dos de maiores dimensões.

Argamassas bastardas

Utilizando os grupos do quadro 1, analisou-se também influência do volume de cimento no comportamento das argamassas bastardas. A análise da estrutura porosa deste grupo (fig. 8) permite observar algumas diferenças comparativamente com o grupo das argamassas de cimento. Numa primeira análise é possível notar uma diminuição da quantidade de poros de grandes dimensões, o que se deve ao facto de a granulometria da cal aérea ser inferior à do cimento, colmatando os vazios gerados entre as partículas maiores

e diminuindo o volume de poros de maiores dimensões da amostra.

Outro fator interessante, e que difere das argamassas de cimento, prende-se com o facto de os poros de diâmetros 1 e 2 μm apresentarem sensivelmente os mesmos volumes independentemente da quantidade de cimento utilizada. O mesmo já não se verifica na zona dos poros de dimensões inferiores a 0,5 μm , na qual se pode ver um ligeiro aumento da quantidade de poros nesta gama com o aumento do volume de cimento no traço.

Na figura 9 apresenta-se uma análise comparativa da porometria das argamassas testadas, na qual pode ser observada a presença de um maior volume de poros de 1 e 2 μm nas argamassas bastardas quando comparadas com as de cimento, e volumes significativamente maiores das argamassas

de cimento na gama de poros de dimensões superiores a 100 μm .

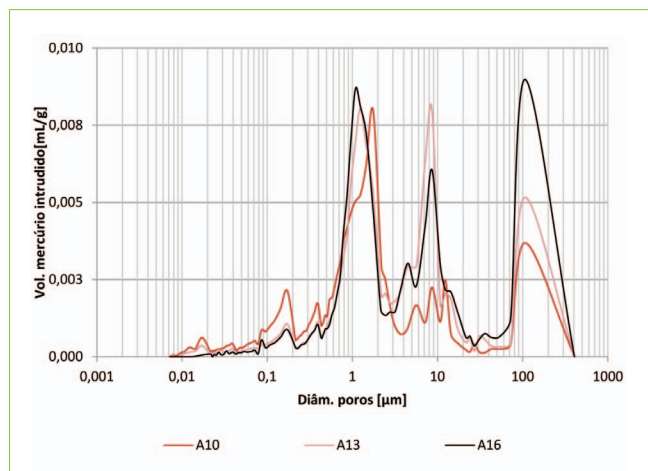
Uma análise à estrutura porosa das 18 composições permitiu constatar que a quantidade de cimento influencia a quantidade de poros mais finos, que no caso das argamassas de cimento se situam em diâmetros inferiores a 3 μm e para as argamassas bastardas em diâmetros inferiores a 1 μm . Nestas gamas de valores constata-se a existência de uma relação entre os diâmetros e os valores de teores de água em equilíbrio durante a fase de desadsorção. A um maior volume de poros nas gamas referidas maiores correspondem teores de água de equilíbrio mais elevados nos diferentes patamares de HR testados. Este fenómeno tem como consequência um aumento da condutibilidade térmica dos materiais, como é visível na figura 10 para o caso

> Figura 4: Curvas de armazenamento de humidade de argamassas de cimento.

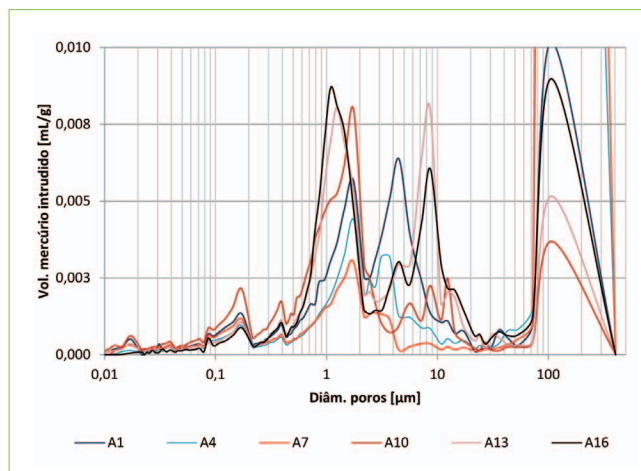
> Figura 5: Intrusão incremental de mercúrio nas amostras de argamassas de cimento em função dos respectivos diâmetros.

> Figura 6: Esquema de um poro tipo "tinteiro".

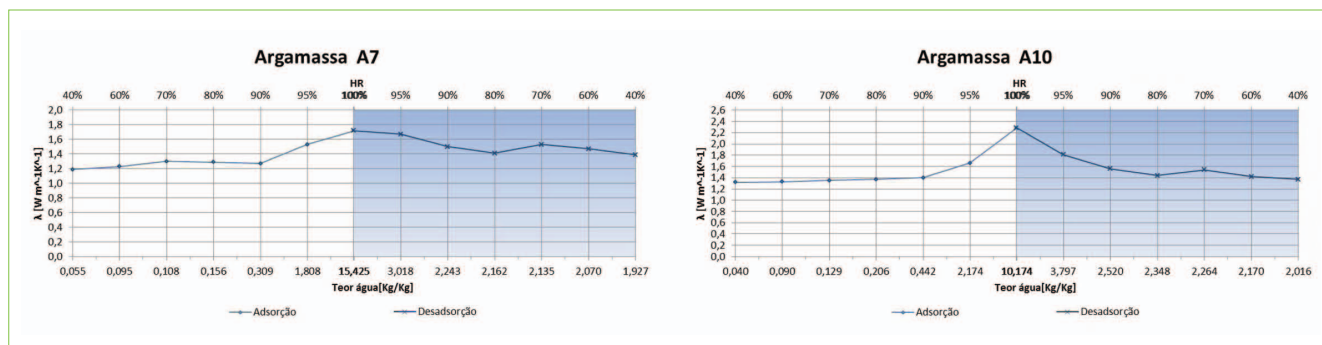
> Figura 7: Curva de armazenamento de humidade para argamassas bastardas.



> 8



> 9



>10

de duas das argamassas testadas, tanto para adsorção como para a desadsorção.

Em alguns casos observaram-se aumentos de cerca de 20% do valor da condutibilidade térmica na fase desadsorção comparativamente com as mesmas condições na fase de adsorção.

CONCLUSÕES

A análise dos resultados permite concluir que tanto nas argamassas de cimento como nas bastardas a quantidade de cimento tem um papel importante na capacidade de retenção de humidade, dado que influencia o volume de poros de pequenas dimensões. Quanto maior for a quantidade

de cimento maiores vão ser os teores de água de equilíbrio durante a fase de desadsorção. Este aumento do efeito histerético implicará maiores valores de condutibilidade térmica das argamassas, o que permite enfatizar a importância de se considerarem estes efeitos no estudo das soluções construtivas por forma a minimizar os riscos de ocorrência de anomalias. ■

REFERÊNCIAS

- [1] ASTM International – *Standard test method for hygroscopic sorption isotherms of building materials*. C 1498:04. West Conshohocken, 2004.
- [2] Collet F., Bart M., Serres L., Mirel J. – *Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials*. Construction and Building Materials, 22:1271-1280, Elsevier, 2007.
- [3] Hansen, K.K. *Sorption isotherms: A catalogue*. Technical report, The Technical University of Denmark, Lyngby, 1986.
- [4] Henriques, Fernando – *Comportamento higrótico de edifícios*. Caparica, FCT/UNL, 2011.
- [5] Horikawa T., Do D. D., Nicholson D. – *Capillary condensation of adsorbates in porous materials*. Advances in Colloid and Interface Science, 169:40-58, Elsevier, 2011.
- [6] Kwiatkowski J., Wołoszyn M., Roux J.J. – *Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials*. Building and Environment, 44:633-642, Elsevier, 2008.
- [7] Ramos, Nuno M. – *A importância da inércia higróscópica no comportamento higrótico de edifícios*. Porto, FEUP, 2007. Tese de doutoramento.
- [8] Tompsett G. A., Krogh L., Griffin D. W., Conner W. C. – *Hysteresis and scanning behavior of mesoporous molecular sieves*. Langmuir, 21:8114-8225, American Chemical Society, 2005.

> Figura 8: Intrusão incremental de mercúrio nas amostras de argamassas bastardas em função dos respetivos diâmetros.

> Figura 9: Análise comparativa da porosimetria entre as argamassas de cimento e as bastardas.

> Figura 10: Variação da condutibilidade com o teor de água.